ISSN 1157-4887

# LES CAHIERS DE SCIENCE & VIE

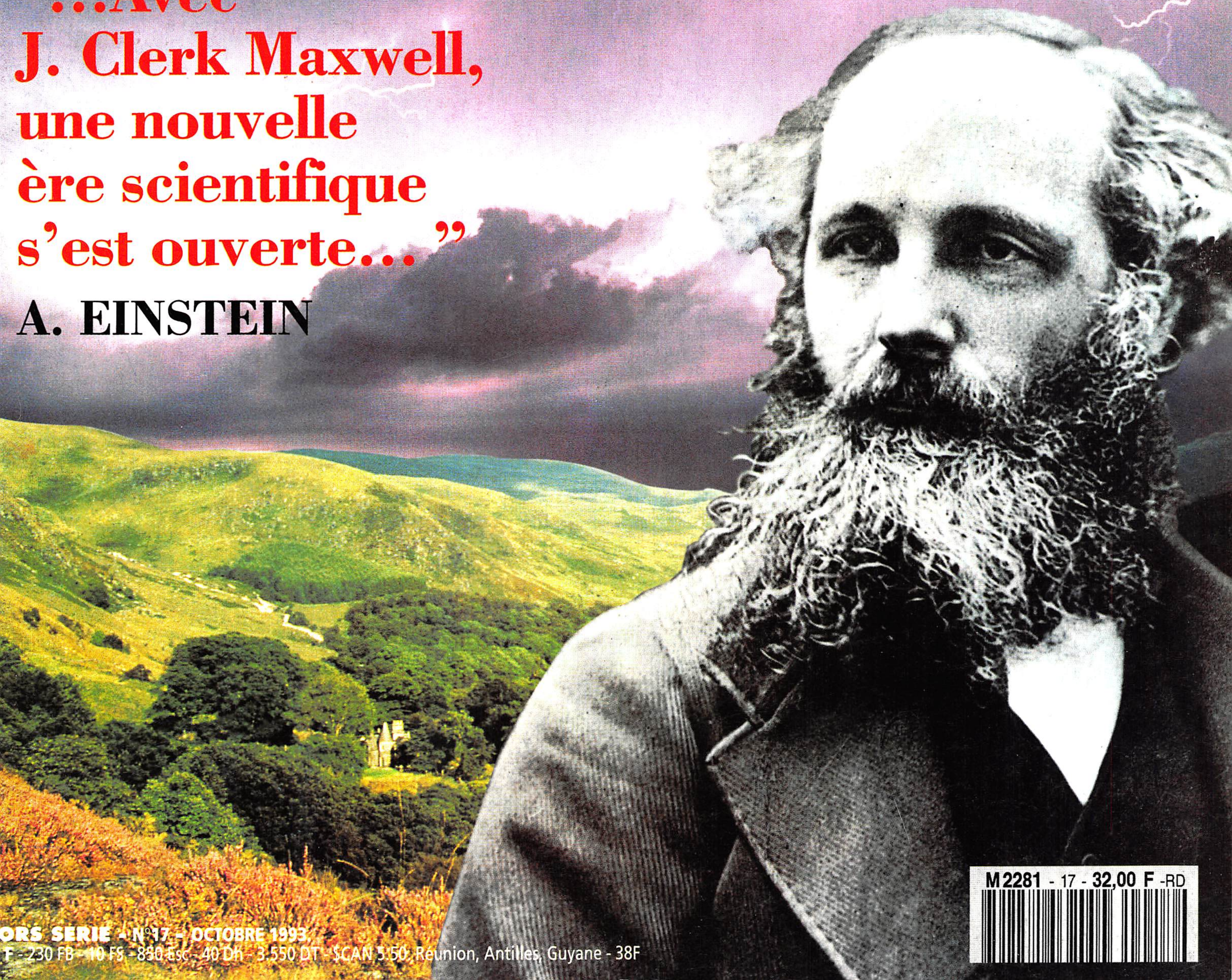
LES PÈRES FONDATEURS DE LA SCIENCE

# MAXWELL

## ou les champs de la lumière

"...Avec J. Clerk Maxwell, une nouvelle ère scientifique s'est ouverte..."

A. EINSTEIN



M 2281 - 17 - 32,00 F -RD

ORS SERIE - N°17 - OCTOBRE 1993

F - 230 FB - 10 FS - 850 Esc - 40 Dh - 3.550 DT - $CAN 5.50, Réunion, Antilles, Guyane - 38F

# MATIÈRE VIVANTE, MATIÈRE GRISANTE.

**Un numéro hors série
de Science & Vie
pour faire la synthèse sur les grandes
questions que posent la matière vivante
et sa fabuleuse complexité.**

**En vente partout**

SCIENCE & VIE HORS SÉRIE

# DEUS EX MACHINA

Comme l'a écrit Einstein : « *Avec James Clerk Maxwell, un âge scientifique a pris fin, un autre a commencé...* » En quoi cela est-il vrai ? Quel est ce nouvel âge dont Einstein attribue à Maxwell l'origine ?

Il faut d'abord le caler dans le temps et l'espace. James Clerk Maxwell naît en Ecosse en 1831. Il meurt à Cambridge en 1879. Sa première œuvre scientifique est publiée en 1856. Trois dates qui circonscrivent son monde : l'Angleterre victorienne. Dans son article, Matthew Norton Wise nous explique que cela n'est pas indifférent.

Parlons de physique, et commençons par rappeler que Maxwell est l'inventeur des équations du champ électromagnétique et de la théorie électromagnétique de la lumière. On sait en quoi cette théorie fut essentielle à Einstein [1]. Mais à travers ses disciples, ceux qu'on a appelés les maxwelliens – dont Hertz – c'est aussi notre monde de la communication à distance, le village planétaire de McLuhan, qui en dérive.

Electricité et magnétisme : il a fallu du temps pour comprendre les circonstances dans lesquelles ces deux mots n'en forment qu'un. Leur union, avant de prendre la forme abstraite que Maxwell lui a donnée, naît du concret. Plus précisément, d'une longue série d'expériences faisant apparaître leur action réciproque. Elles sont rappelées dans ce numéro.

Voyons-les sous un angle plus romanesque. Toutes nous disent que l'espace est hanté par des forces mystérieuses. Rappelons qu'on ignore à l'époque la nature du courant électrique. Ces forces font tourner des aimants autour de fils conducteurs quand y passent des courants, font naître des courants dans des bobines quand bougent des aimants, modifient la lumière polarisée. Dans ce numéro, il sera donc question d'effets dynamiques visibles, d'objets invisibles et d'espace. Bref, nous pourrions nous imaginer dans un château d'Ecosse : les armures bougent toutes seules, les candélabres sont soufflés, on entend des bruits de porte. Il y a quelque part des énergies occultes. Les fantômes, chacun le sait, n'en sont que des formes. On connaît aussi leurs vertus habituelles : ils hantent l'espace en traversant les murs et leur présence se traduit par des courants d'air en tout sens. D'où l'intérêt particulier des chasseurs de fantômes pour les flux d'énergie à travers les surfaces et l'étude de la circulation générale de l'air.

Maxwell croit en Dieu et non pas aux fantômes. Revenons à sa science.

Les expériences de Faraday l'ont montré : magnétisme et électricité sont mutuellement enlacés. La circulation d'un courant engendre aussitôt une force magnétique, le déplacement d'un aimant une force électromotrice traduite par la déviation de l'aiguille d'un galvanomètre. Ce couplage implique une propriété cachée de l'espace que révèle la présence d'une charge ou d'un aimant. Considérons le cas le plus simple de la statique : la force d'attraction d'une charge immobile s'exerce dans l'espace selon des lignes d'un champ qu'on peut imaginer sous la forme d'un oursin. Ce champ, le champ électrique, **se révèle** dès que la charge est là. De façon similaire, la force d'attraction d'un aimant immobile dans l'espace s'exerce selon les lignes, circulaires cette fois-ci, d'un autre champ : le champ magnétique. A la différence de la force de gravitation (au moins dans l'idée que tout le monde s'en fait alors, c'est-à-dire avant Einstein), forces magnétique et électrique ne peuvent se concevoir sans la notion d'un espace **actif**. Cette nouvelle vision constitue un basculement majeur dans l'histoire de la physique. Les expériences ayant prouvé l'induction réciproque des phénomènes électriques et magnétiques, selon quelles lois mathématiques quantifier les variations couplées des champs électriques et magnétiques ? C'est la tâche que s'assigne Maxwell. A l'aide de deux notions, celles de flux et de circulation, il écrira sous différentes versions les quatre équations générales de l'électromagnétisme, assorties d'une théorie de la lumière comme propagation d'une onde électromagnétique dans l'espace.

Le problème du déplacement des fantômes était donc résolu. Certes, mais dans les termes abstraits du calcul vectoriel. Une analogie avec les fluides avait servi de base à l'édification de la théorie. Elle n'était cependant d'aucune utilité pour se faire une représentation concrète de la propagation dans l'espace d'une onde électromagnétique ou d'un champ. Les physiciens du XX^e^ siècle, rompus à la manipulation mathématique de concepts abstraits comme les quanta, s'arrangeront très bien de cette abstraction. Ils y verront même la première manifestation de leur propre physique, faisant ainsi de Maxwell leur père fondateur.

Le caractère abstrait de sa théorie le dérangeait pourtant et il essaya de donner une réalité matérielle à ses équations. Cette tentative, on le verra, n'est pas sans rappeler la façon dont les fantômes apparaissent sur les scènes de théâtre : grâce à des **mécanismes**. Dans la langue des coulisses, ils portent nom précis, *deus ex machina*, et ont pour rôle de dénouer les situations bloquées. L'éther, le milieu qu'il imagine pour expliquer la propagation par induction mutuelle des champs électrique et magnétique est tout bâti en pignons et engrenages, emplissant tout l'espace....

Ces dessins et machines ont depuis longtemps rejoint les combles de notre Xanadou [2]. Ils y dorment aux côtés des tourbillons de Descartes, du calorique de Lavoisier, des carnets alchimiques de Newton, bref, de tous ces objets qui révèlent le champ de l'imaginaire dans lequel la raison s'exerce à créer de l'ordre dans le monde. Mais entre ordre et désordre, la barrière est mince. On dit qu'à Xanadou, circule parfois la nuit un petit démon qui s'amuse à brouiller les cartes du déterminisme : un démon de Maxwell...

**J-P I**

(1) Voir *Cahiers de Science et Vie* n° 16 consacrés à "Einstein"
(2) Par analogie avec les greniers du palais de Citizen Kane, remplis d'une multitude de caisses à jamais fermées.

SOMMAIRE

DEUS EX MACHINA 1

## UNE VIE

JAMES CLERK MAXWELL, UN GENTLEMAN AUX CHAMPS 6
PAR FRANÇOISE BALIBAR
PROFESSEUR DE PHYSIQUE À L'UNIVERSITÉ PARIS VII

## LES ACTEURS

LES MAÎTRES DE L'ÉLECTRICITÉ 14
PAR MICHEL ATTEN
HISTORIEN DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES, FRANCE TELECOM, CNET, PARIS

L'AIR DU TEMPS 23
PAR EMMANUEL CHADEAU
PROFESSEUR D'HISTOIRE CONTEMPORAINE À L'UNIVERSITÉ LILLE III

## L'HISTOIRE

ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME : L'UNION FAIT LA FORCE 30
PAR CHRISTINE BLONDEL
CHARGÉE DE RECHERCHE AU CNRS, CENTRE DE RECHERCHES EN HISTOIRE DES SCIENCES ET TECHNIQUES, CITÉ DES SCIENCES ET DE L'INDUSTRIE, PARIS

UNE THÉORIE EN QUATRE LIGNES 36
PAR GÉRARD CHEVALIER

ENLACEMENTS DANS L'ÉTHER, SIGNAUX SOUS LA MER 44
PAR MATTHEW NORTON WISE
PROFESSEUR D'HISTOIRE DES SCIENCES À L'UNIVERSITÉ DE PRINCETON, NEW JERSEY

LA MOISSON DES MAXWELLIENS 62
PAR BRUCE J. HUNT
PROFESSEUR D'HISTOIRE À L'UNIVERSITÉ DU TEXAS, AUSTIN

## ET APRES

UN DÉMON POUR SAUVER DIEU 72
PAR GÉRARD CHEVALIER

DERNIER DES CLASSIQUES, PREMIER DES MODERNES 82
PAR ANDREW WARWICK
PROFESSEUR D'HISTOIRE DES SCIENCES, IMPERIAL COLLEGE, LONDRES

## ET MAINTENANT

DES RADARS AUX FIBRES OPTIQUES... 90
PAR CHARLES VASSALLO
INGÉNIEUR DES TÉLÉCOMMUNICATIONS, CNET, LANNION

### Rectificatifs

**Venue de Suisse, une lettre nous signale une erreur dans le dessin p. 55 du numéro précédent consacré à Einstein. Dans le troisième dessin de la colonne C, l'onde lumineuse ne parvient pas au temps T2 au sommet du détecteur vertical. Dans cette hypothèse d'une propagation libre dans l'éther, elle a en effet suivi un parcours oblique, plus long que la dimension du détecteur : mais T'2 (>T2) reste inférieur à T3 et la conlusion de l'expérience inchangée. Merci à Dominic Berthold pour sa lecture attentive.**

**Les observations astronomiques ayant permis de vérifier la déviation des rayons lumineux à proximité du champ gravitationnel solaire ont porté sur des étoiles de l'amas des Hyades, ainsi qu'il est écrit p. 23 et p. 77 et non sur Sirius comme c'est indiqué en p. 81.**

**Par ailleurs, une erreur très regrettable, indépendante de l'auteur de l'article et portant sur la date de la mort d'Einstein, s'est glissée en p.86. Einstein est mort dans la nuit du 17 au 18 avril 1955 (et non le 14 avril).**

**Photos de couverture : G. Trool – Dumfries and Galloway, Office du tourisme ; Gamba-Sipa ; Palais de la Découverte.**
**Photo ci-contre : The Cavendish Laboratory**

**PRIX NORMAL D'ABONNEMENT AUX CAHIERS DE SCIENCE & VIE PANORAMA (1 AN) : 12 NUMEROS + 6 CAHIERS S &VIE : 404 FF**
**MAXI PANORAMA (1 AN) : 12 NUMEROS + 4 HORS SERIE + 6 CAHIERS S & VIE : 479 FF**
**CANADA :** PERIODICA INC. CP 444 OUTREMONT, Québec, CANADA H2V 4R6
PANORAMA (1 AN) 79,50 $CA-MAXI PANORAMA (1 AN) 97,50 $CA
**SUISSE :** NAVILLE Case Postale 1211, GENEVE 1- SUISSE.
PANORAMA (1 AN) 131 FS-
MAXI PANORAMA 155 FS
AUTRES PAYS NOUS CONSULTER

**PUBLIE PAR EXCELSIOR PUBLICATIONS S.A.** 1, RUE DU COLONEL PIERRE AVIA 75503 PARIS. CEDEX 15 - TEL : 46.48.48.48
**EXCELSIOR PUBLICATIONS S.A.** CAPITAL SOCIAL : 11 100 000 F - DUREE 99 ANS
**PRINCIPAUX ASSOCIES :** M. JACQUES DUPUY, MELLE YVELINE DUPUY, M. PAUL DUPUY.

**DIRECTION ET ADMINISTRATION :**
PRESIDENT-DIRECTEUR GENERAL : PAUL DUPUY, DIRECTEUR GENERAL : JEAN-PIERRE BEAUVALET, DIRECTEUR GENERAL ADJOINT : FRANCOIS FAHYS, DIRECTEUR FINANCIER : JACQUES BEHAR, DIRECTEUR COMMERCIAL PUBLICITE : PATRICIA BRAULT, DIRECTEUR MARKETING ET COMMERCIAL : MARIE-HELENE ARBUS, DIRECTEUR MARKETING ET COMMERCIAL ADJOINT, DIRECTEUR DES VENTES : JEAN- CHARLES GUERAULT, DIRECTEUR DE LA FABRICATION : PASCAL REMY. DIRECTEUR DES ETUDES : ROGER GOLDBERGER,

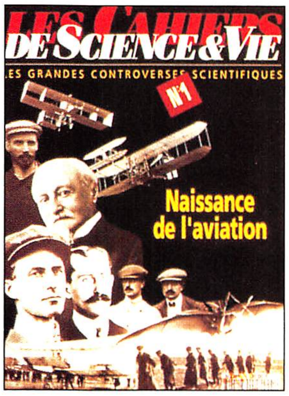
**COMITE DE REDACTION :** PHILIPPE COUSIN, JEAN DHOMBRES, BRUNO LATOUR, MICHEL SERRES, EMMANUEL CHADEAU.

**REDACTION :** JEAN-PIERRE ICIKOVICS (REDACTEUR EN CHEF), NICOLAS JOURNET (REDACTEUR EN CHEF ADJOINT), NAJAT NEHME (SECRETAIRE DE REDACTION), ALINE HOUILLON (SECRETAIRE), STEPHANIE DE MAREUIL (ICONOGRAPHE), JEAN WITTA (CONCEPTION GRAPHIQUE), DENIS MALARTRE (MAQUETTISTE), MONIQUE VOGT (SERVICE LECTEURS).

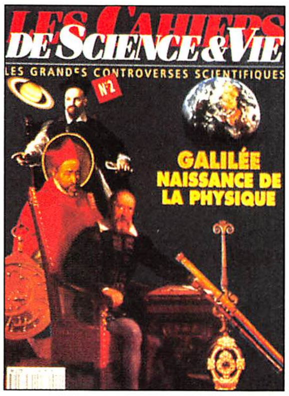
**SERVICES COMMERCIAUX :** RELATIONS EXTERIEURES : MICHELE HILLING ASSISTEE DE GUYLAINE BREHIN, ABONNEMENTS : PATRICK SARRADEIL, COMMANDES D'ANCIENS NUMEROS ET RELIURES : CHANTAL POIRIER TEL : 46.48.47.18 , RELATIONS CLIENTELES ABONNES : PAR TELEPHONE (1)46.48.47.08 DE 9H00 A 12H00, PAR COURRIER : SERVICE DES ABONNEMENTS : 1 RUE DU COLONEL PIERRE AVIA 75503 PARIS CEDEX 15, CHEF DE PRODUIT MARKETING : ANTOINE COUBRAY TEL. : 46.48.47.31 VENTE AU NUMERO : PIERRE BIEURON ASSISTE DE BERNADETTE CRIBIER. REASSORTS ET MODIFICATIONS : TERMINAL E 91 TEL. VERT : 05.43.42.08 (RESERVE AUX DEPOSITAIRES DE PRESSE).
PUBLICITE KARINE PARENT EXCELSIOR-PUBLICITE, INTERDECO 27, RUE DE BERRI - 75008 PARIS TEL : 44.35.11.97

**DIRECTEUR DE LA PUBLICATION : PAUL DUPUY - DÉPÔT LÉGAL : N° 84007 - N° DE COMMISSION PARITAIRE : 57284 DU 15 DÉCEMBRE 1975 PHOTOGRAVURE : FLASH IMAGE - IMPRESSION : IMPRIMERIE DE MASSY JEAN DIDIER, F/91300 MASSY - PRINTED IN FRANCE.**

# COLLECTIONNEZ LES CAHIERS DE SCIENCE & VIE ET VIVEZ L'HISTOIRE DE LA SCIENCE COMME ON NE VOUS L'A JAMAIS RACONTÉE

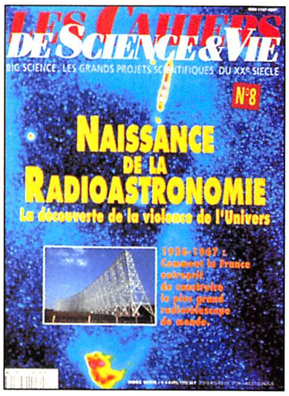



**N°1 NAISSANCE DE L'AVIATION**
Farman ou les Wright, qui a inventé l'avion ?

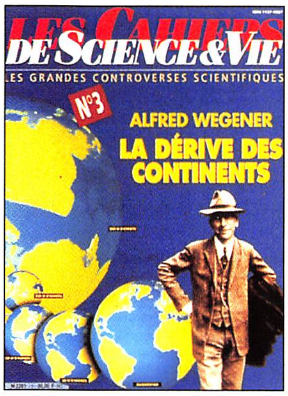



**N°2 GALILEE**
La naissance de la physique moderne.

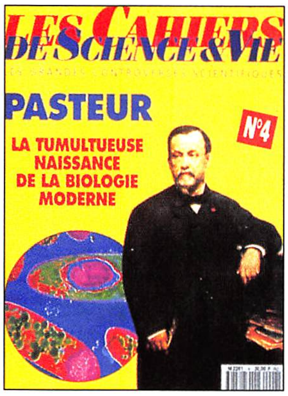
**N° 7 LE PROJET MANHATTAN**
Construction de la première bombe atomique




**N°8 LA RADIO-ASTRONOMIE**
Une nouvelle fenêtre sur le ciel

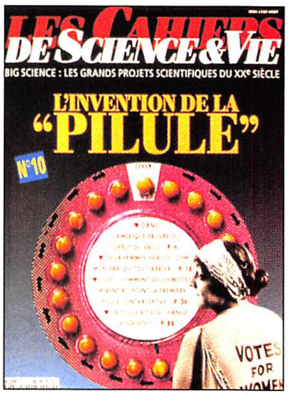



**N°3 LA DERIVE DES CONTINENTS**
Wegener, l'homme d'une géniale découverte.



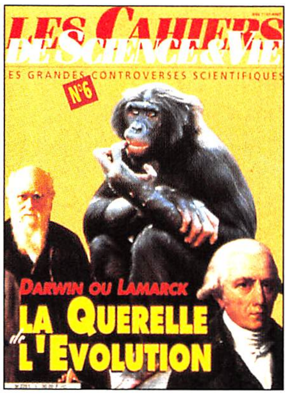

**N°4 PASTEUR**
Tumultueuse naissance de la biologie moderne

**N° 9 LA NAISSANCE DU CONCORDE**
Un exemple de coopération internationale




**N° 10 LA PILULE CONTRACEPTIVE**
De la "Big Science" chimique et médicale

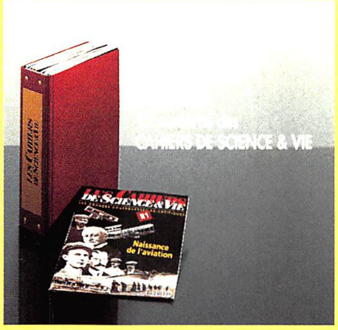
**N°5 FRESNEL**
Quelle est la vraie nature de la lumière ?




**N°6 DARWIN ou LAMARCK**
La querelle de l'évolution

**N° 11 De SPOUTNIK à GAGARINE**
L'espace comme champ de bataille de la guerre froide.

**N° 12 LA PHYSIQUE GEANTE**
Du gigantesque pour observer l'infiniment petit.




## BON DE COMMANDE

à compléter et à renvoyer avec votre règlement libellé à l'ordre des CAHIERS DE SCIENCE & VIE-Bred, sous enveloppe affranchie à :
CAHIERS DE SCIENCE & VIE Service VPC - 1, rue du Colonel Pierre Avia - 75503 Paris cedex 15

NOM Prénom ____________________

ADRESSE ____________________

CODE POSTAL ____________ VILLE ____________

OUI, je commande les numéros suivants des CAHIERS DE SCIENCE & VIE au tarif unitaire de 30 F (Etranger : 40 FF) :
❑ 1 ❑ 2 ❑ 3 ❑ 4 ❑ 5 ❑ 6 ❑ 7 ❑ 8 ❑ 9 ❑ 10 ❑ 11 ❑ 12

Je commande.................... reliure(s) des CAHIERS DE SCIENCE & VIE au tarif unitaire de 65 F (Etranger : 75 FF)

Le montant total de ma commande est de........... F

Offres valables jusqu'à fin 1993 et conformes aux recommandations de la CNIL. RCS Paris B 572 134 773 csv17

# Une Vie

Qu'est-ce qu'un fils d'avocat et *landlord* écossais, héritier de la rudesse des Maxwell et de la culture des Clerk, peut bien aller préparer à Cambridge en 1850 ? La prêtrise ? Son droit ? Non, dans son cas, le choix est clair et définitif : c'est aux sciences et aux mathématiques qu'il se destine. L'homme qui allait transformer la physique électromagnétique ne connaîtra, dans sa vie relativement courte, qu'un seul grand dilemme : vivre sur les terres de son clan ou sur celles de l'Université britannique.

CAVENDISH LABORATORY

# James Clerk Maxwell

# Un gentleman aux champs

**Descendant d'une vieille lignée écossaise, James Clerk Maxwell se partagea entre Glenlair, la demeure familiale, où il écrivit son grand œuvre, le « Traité d'électricité et de magnétisme », Londres et Cambridge. Quelques drames et peu de joies ont tissé la vie de cet intellectuel austère qui voyait dans les lois de la nature la révélation de la Sagesse et de la Vérité éternelle.**

Par Françoise Balibar

A première vue, la biographie de James Clerk Maxwell n'a rien de bien excitant. Né le 13 juin 1831, descendant d'une famille de nobles écossais, orphelin de mère à l'âge de 8 ans, il fait des études secondaires à l'académie d'Edimbourg où il se lie d'amitié avec celui qui devait devenir son confident de toujours et son biographe, l'érudit antiquisant Lewis Campbell. Après deux années d'études à l'université d'Edimbourg, il entre en 1850 à Cambridge (Trinity college) où il étudie sous la direction des meilleurs professeurs de l'époque. Nommé Fellow de Trinity college en 1855, il occupe des chaires de professeur d'abord à Marischal College (Aberdeen) puis au King's College (Londres). En 1858, il épouse la fille du Principal de son collège d'Aberdeen dont il n'aura pas d'enfant. En 1865, Maxwell abandonne la vie académique et se retire pendant six ans sur ses terres écossaises, à la fois pour en assurer la mise en valeur et pour rédiger son fameux *Traité d'électricité et de magnétisme*. En 1871, il fait un *comeback* à l'Université et est nommé professeur de physique expérimentale à Cambridge où il conçoit et développe le Cavendish Laboratory. Il meurt en 1879, à l'âge de 48 ans, d'un cancer à l'abdomen.

## L'Ecosse de Walter Scott et celle d'Adam Smith

En somme, Maxwell est né, il a étudié à Cambridge, il est devenu professeur au même endroit et il est mort. On imagine difficilement une vie moins romantique...

Pourtant, un événement de cette biographie ne peut manquer de retenir l'attention : Maxwell, à l'âge de 34 ans, a éprouvé le besoin de sortir de cette vie toute tracée et s'est retiré à la campagne pour cultiver son héritage et écrire son grand œuvre. Celui-ci définit à jamais, au même titre que les *Principia* de Newton, la physique classique. Il est des gens dont la vie a pour centre, à la fois symbolique et réel, une maison. Maxwell, comme une étude plus approfondie de sa vie le révèle, est de ceux-là.

La maison qui a joué un rôle de pivot dans la vie de Maxwell se nomme Glenlair. Demeure classique aux toits pentus, blottie au cœur d'un bois, Glenlair est située dans le comté de Galloway, au sud de l'Ecosse. Riante et vallonnée, cette région fut pendant des siècles le théâtre de féroces luttes claniques, au rang desquelles il faut citer le combat féodal et sanglant qui opposa les Maxwell et les Johnstone. Le grand moment de cet affrontement digne des drames de Shakespeare est une bataille rangée qui opposa en 1593 les deux mille hommes de Lord Maxwell, septième du nom, aux Johnstone moins nombreux mais mieux armés. Au cours de cette bataille, Lord Maxwell fut sauvagement décapité après qu'on lui eut tranché la main qu'il tendait pour demander un ar-

James Clerk Maxwell et sa femme Katherine, née Dewar, en 1869.

MAXWELL FOUNDATION

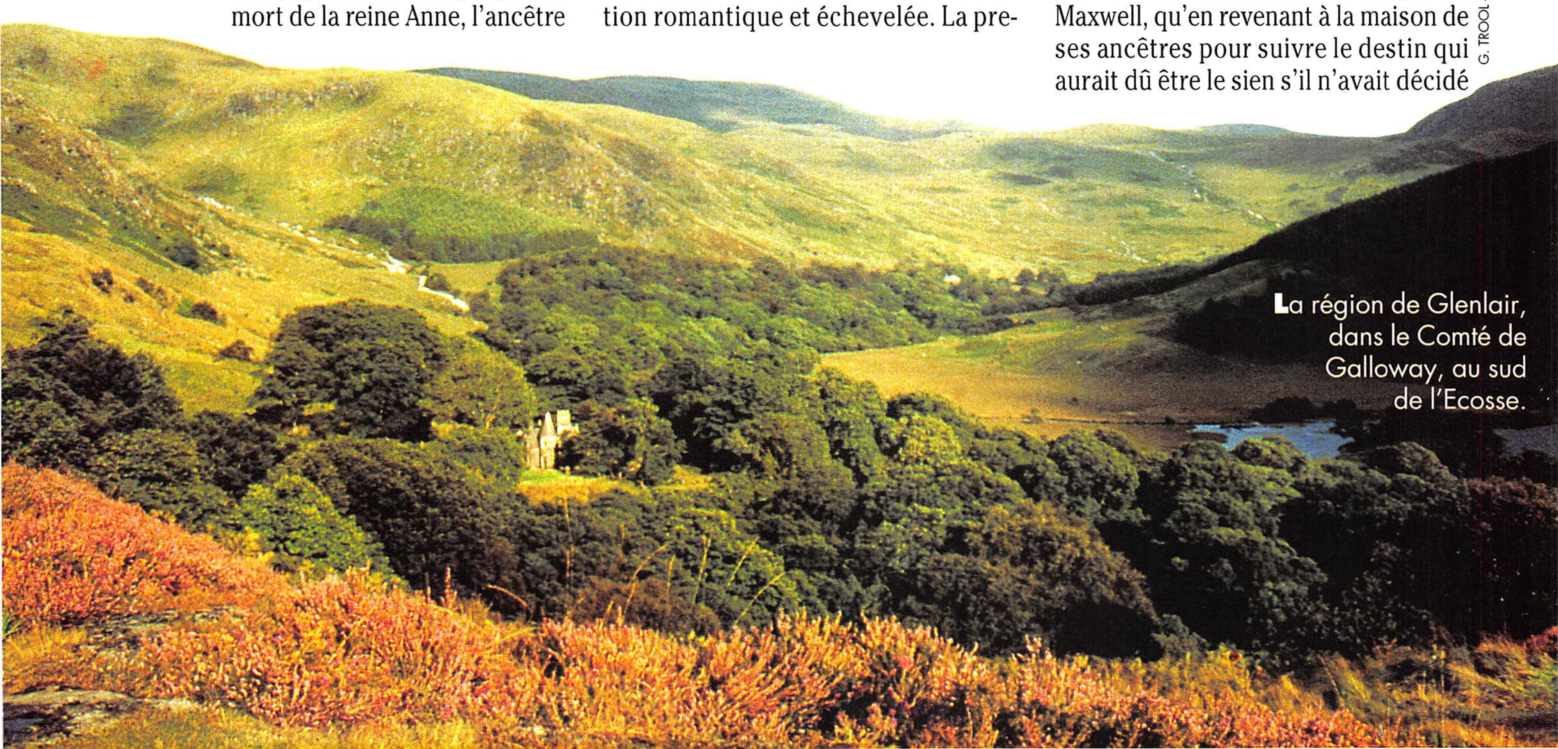
mistice. Son fils attendit plusieurs années avant de pouvoir savourer sa vengeance ; il parvint à tuer Sir James Johnstone après s'être introduit auprès de lui par la ruse. Banni du royaume, il erra un certain temps en France, revint en Ecosse et fut décapité. Inutile de dire que les Maxwell, ces *desperados* de naissance, épousèrent la cause perdue des Stuart. L'auteur de la théorie de l'électromagnétisme avait hérité d'une horloge ayant orné la chambre où Mary Queen of Scots passa les deux dernières nuits de sa courte vie.

Mais, comme chacun sait, Maxwell portait deux noms : Maxwell et Clerk. Les Clerk étaient les représentants d'une tradition tout aussi écossaise que celle des Maxwell mais totalement différente : la tradition rationaliste et moderniste, celle de ces hommes qui, au XVIII[e] siècle et au début du XIX[e], ont fait de l'Ecosse l'un des hauts lieux de la vie intellectuelle et un pôle économique de l'Europe. Les Clerk, tout comme les Maxwell, étaient de noble et ancienne origine. Riches propriétaires terriens (leur domaine est encore aujourd'hui l'un des plus vastes de la région située au sud d'Edimbourg), ils surent toujours tirer leur épingle du jeu lors des divers bouleversements politiques que connut leur pays. C'est ainsi qu'après la mort de la reine Anne, l'ancêtre de Maxwell qui porte le nom de Clerk of Penicuik (prononcer Pénicouk), se retira prudemment sur ses terres et réapparut quelques mois plus tard transformé en supporter zélé et efficace de la maison de Hanovre. Il était de tradition chez les Clerk of Penicuik d'envoyer les garçons faire leurs études à l'étranger, à Leyde ou à Paris. Amateurs d'art et de sciences de père en fils, diplomates lorsque le service de leur pays l'exigeait, introducteurs des techniques modernes dans l'exploitation de leurs domaines, les Clerk prospérèrent tout au long du XVIII[e] siècle. Comme toujours dans ce genre de famille, il y eut un raté qui fut incapable de faire quoi que ce soit de sa vie sinon de tomber amoureux d'une descendante de la branche légitime des Maxwell, Agnes Maxwell of Middlebie. C'est par leur mariage, qu'au terme de partages juridiquement compliqués, le nom de Maxwell devint associé à celui de Clerk et que la terre de Glenlair échut au père de Maxwell.

## MAXWELL N'EST PAS UN PHYSICIEN ANGLAIS

On ne saurait sous-estimer l'importance de ce double héritage dans la vie de James Clerk Maxwell. Maxwell s'est toujours senti le représentant à la fois de la tradition rationaliste et de la tradition romantique et échevelée. La première, celle des grandes universités écossaises, est associée aux noms du philosophe David Hume et de l'économiste Adam Smith ; elle fut renforcée par l'arrivée en Ecosse des dissidents exclus pour des raisons religieuses de Cambridge et d'Oxford. La deuxième est celle de Walter Scott et de Thomas Carlyle, des vendettas historiques et des vieilles légendes celtes. Maxwell était avant tout un "laird", lié à ses terres à la fois par ses sentiments et par la raison. Autant il paraît vain et artificiel d'analyser l'œuvre de Maxwell comme portant la trace d'une permanente opposition entre les ténèbres effrayantes des vieux contes calédoniens (le "démon" fait évidemment merveille dans ce contexte) et la tradition des lumières et des entrepreneurs d'Edimbourg, autant il est juste de dire que la vie personnelle de Maxwell a été entièrement dominée par ses origines écossaises. Maxwell est tout sauf un Anglais et ce n'est pas un hasard si, à un âge où l'on ne pense généralement qu'à pousser plus avant les avantages intellectuels et institutionnels acquis, Maxwell a éprouvé le besoin de quitter le monde universitaire anglais, ses succès faciles et ses flatteries trompeuses. Peut-être avait-il eu le sentiment qu'il ne pourrait vraiment devenir lui-même, c'est-à-dire le grand Maxwell, qu'en revenant à la maison de ses ancêtres pour suivre le destin qui aurait dû être le sien s'il n'avait décidé

G. TROOL - DUMFRIES AND GALLOWAY TOURIST BOARD



La région de Glenlair, dans le Comté de Galloway, au sud de l'Ecosse.

PHOTOS MAXWELL FOUNDATION

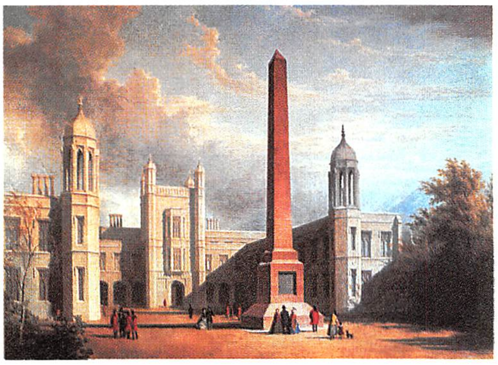
**J**ames en 1834, dans les bras de sa mère. Frances Maxwell mourra d'un cancer en 1839, quand son fils n'a que 8 ans. Dès lors, c'est son père, John, qui s'occupera de lui (ci-dessous). En bas à gauche : P.G. Tait, l'ami de toujours : Maxwell et lui se rencontrent au collège, à Edimbourg. En bas à droite, J.C. Maxwell enfant, dessin de son oncle William Dyce Cay.

d'aller étudier à Cambridge. Le destin d'un homme soucieux de perpétuer son héritage de la façon la plus rationnelle qui soit et dans le respect de ceux qui travaillent pour lui. A vrai dire, Maxwell se situe à une époque charnière et, comme il le rappelle lui-même, il a bien failli ne jamais devenir un homme de science, ou du moins ne jamais faire de la science en professionnel : « *Il aurait été tout naturel que je devienne un avocat de profession ayant du goût pour la science ; mais l'existence d'hommes s'adonnant à la science à l'exclusion de toute autre activité, tel le professeur J.D. Forbes* (l'une des figures de l'université d'Edimbourg) *a convaincu mon père, et moi-même, qu'il n'était pas nécessaire d'exercer une profession pour mener une vie utile.* » Il est donc probable que le choix de devenir un universitaire – qui plus est un universitaire anglais, choix qui n'avait rien de "naturel" pour lui – a finalement pesé de façon insupportable sur la vie de Maxwell. C'est peut-être pour fuir le processus d'"acculturation" dans lequel il s'était engagé à l'âge de 22 ans qu'il s'est réfugié dans la maison de son enfance – ce qui lui a permis de donner la pleine mesure de son "génie".

Mais il est probable également qu'une fois le *Traité* achevé, Maxwell, qui avait tout juste 40 ans, a éprouvé le besoin de contacts plus stimulants que ceux qu'il entretenait avec ses chiens et ses chevaux. Si le côté Maxwell de sa personnalité l'avait conduit à se cacher dans les brumes nordiques, le côté Clerk a fini par l'emporter en 1865 : il est revenu à la vie universitaire avec une mission d'entrepreneur. Nommé professeur de physique expérimentale, il eut la charge, qui l'occupa jusqu'à la fin de sa vie, de construire et développer le laboratoire qui devait faire de Cambridge la mecque (après Berlin et Munich quand même) de la physique expérimentale au début du siècle : le Cavendish Laboratory.

Que Maxwell soit un physicien écossais et non anglais, comme on le dit un peu vite lorsqu'on se laisse aller à remplacer "britannique" par "anglais", se marque aussi au fait que le philosophe

MAXWELL FOUNDATION



UNIVERSITÉ D'ABERDEEN

qui l'a le plus influencé est un philosophe écossais, en l'occurence William Hamilton. Là encore, il ne s'agit pas, comme on l'a souvent fait, de voir dans la physique de Maxwell une mise en application directe de la philosophie, voire même de la métaphysique de Hamilton, mais simplement de constater que Maxwell, dont l'étendue des lectures philosophiques était immense, est toujours revenu à Hamilton. Maxwell avait suivi les cours de philosophie de Hamilton lorsqu'il était étudiant à Edinbourg ; entre le maître et l'élève s'étaient noués des liens particuliers (on a découvert il y a quelque temps un article écrit par Maxwell à l'âge de dix-sept ans, rédigé à la demande de Hamilton et intitulé *The Properties of Matter*). Hamilton professait un sérieux relativisme en matière de connaissance humaine. Plus précisément, il tenait que toute connaissance humaine ne peut concerner que les relations entre objets et non les objets eux-mêmes et que le raisonnement par analogie est le seul qui permette de comprendre ces relations. Cette idée avait fortement impressionné le jeune Maxwell. A tel point que plusieurs années plus tard, il écrivait sur le mode ironique à son ami Campbell qu'il était en train de lire la *Critique de la raison pure* de Kant avec « *l'idée bien arrêtée de la mettre en accord avec Sir W. Hamilton* ». On trouvera des échos directs de cette influence dans les articles ultérieurs de Maxwell, en particulier dans *On Faraday's Lines of Force* : « *Bien que des couples de choses puissent différer considérablement l'une de l'autre, la relation entre les éléments d'un de ces couples peut être la même relation entre les objets d'un autre couple. Or du point de vue scientifique, c'est la relation qu'il importe de connaître* ».

Glenlair, le domaine famil ial des Maxwell. Le bâtiment principal a été construit par John, puis la maison a été agrandie par James lorsqu'il est venu s'y installer après avoir quitté le King's College de Londres. A droite : Marischal College, à Aberdeen (peinture de J. Giles) où Maxwell occupa son premier poste. En bas : Edimbourg au XIX[e] siècle.

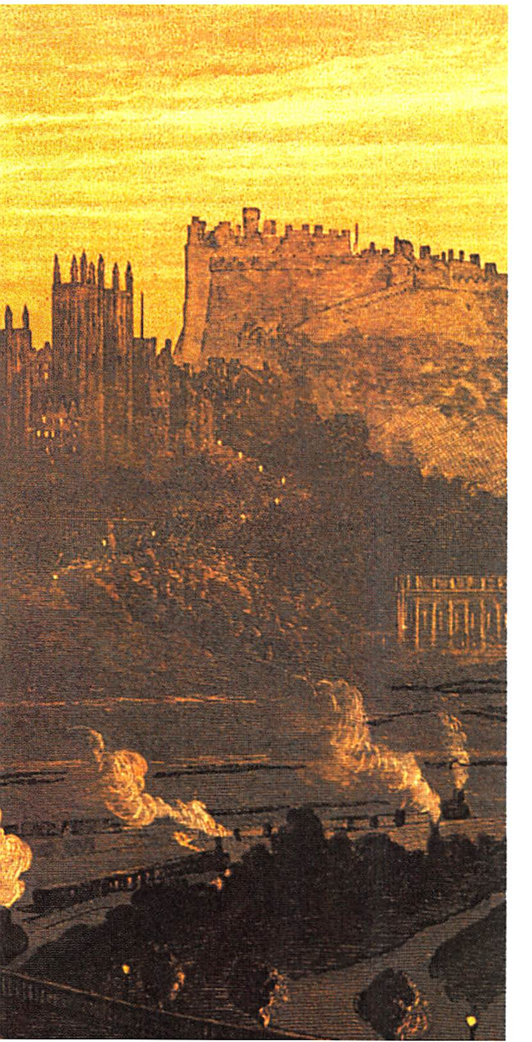
MARY EVANS P.L.

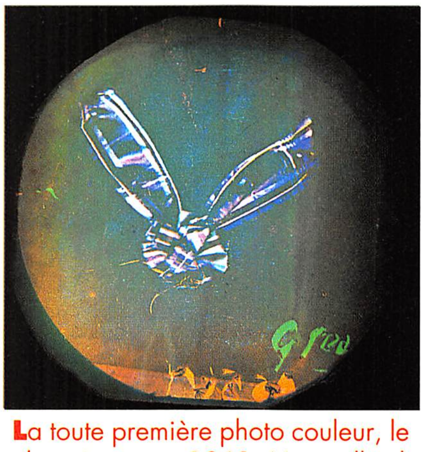
## Une insondable tristesse

Si l'on fouille la biographie de Maxwell à la recherche de ce qui se cache derrière sa désespérante banalité, on tombe, au détour d'une phrase et dans les articles biographiques récents, sur

une information qui, à première vue, semble prometteuse : les auteurs modernes notent tous en effet que c'est avec l'aide de sa femme que Maxwell a effectué un certain nombre de ses recherches expérimentales. La chose est suffisamment rare pour donner envie d'aller y voir de plus près. Madame Maxwell serait-elle encore une de ces oubliées de l'histoire ?

La réalité, pour ce que nous en savons – car ces victoriens avaient un art accompli de la dissimulation – est beaucoup moins intéressante et, à certains égards, beaucoup plus triste. Katherine Mary Dewar, de sept ans plus âgée que Maxwell, était la fille de l'austère Révérend Daniel Dewar, Principal du collège d'Aberdeen où Maxwell occupa un temps un poste de professeur. Il semble bien qu'avant de la connaître Maxwell ait été amoureux de sa cousine et que la famille se soit opposée au mariage par crainte des conséquences de la consanguinité. Toujours est-il que Maxwell épousa en 1858 Katherine Dewar. C'est pendant la première période de leur mariage, avant la retraite à Glenlair et alors qu'il était professeur à Londres, que Maxwell et sa femme ont travaillé ensemble dans un laboratoire privé qu'ils avaient aménagé dans les combles de leur maison. Il semble bien que Katherine Maxwell ait tout d'abord servi de cobaye à son mari qui menait des études sur la vision colorée (Maxwell n'a jamais cessé de travailler dans ce domaine moins connu de son activité ; on ignore généralement qu'il est l'inventeur, en 1861, de la première photographie en couleur). Maxwell constata en effet que sa femme présentait une anomalie de la vision, liée à l'absence de pigment jaune sur la rétine. Plus





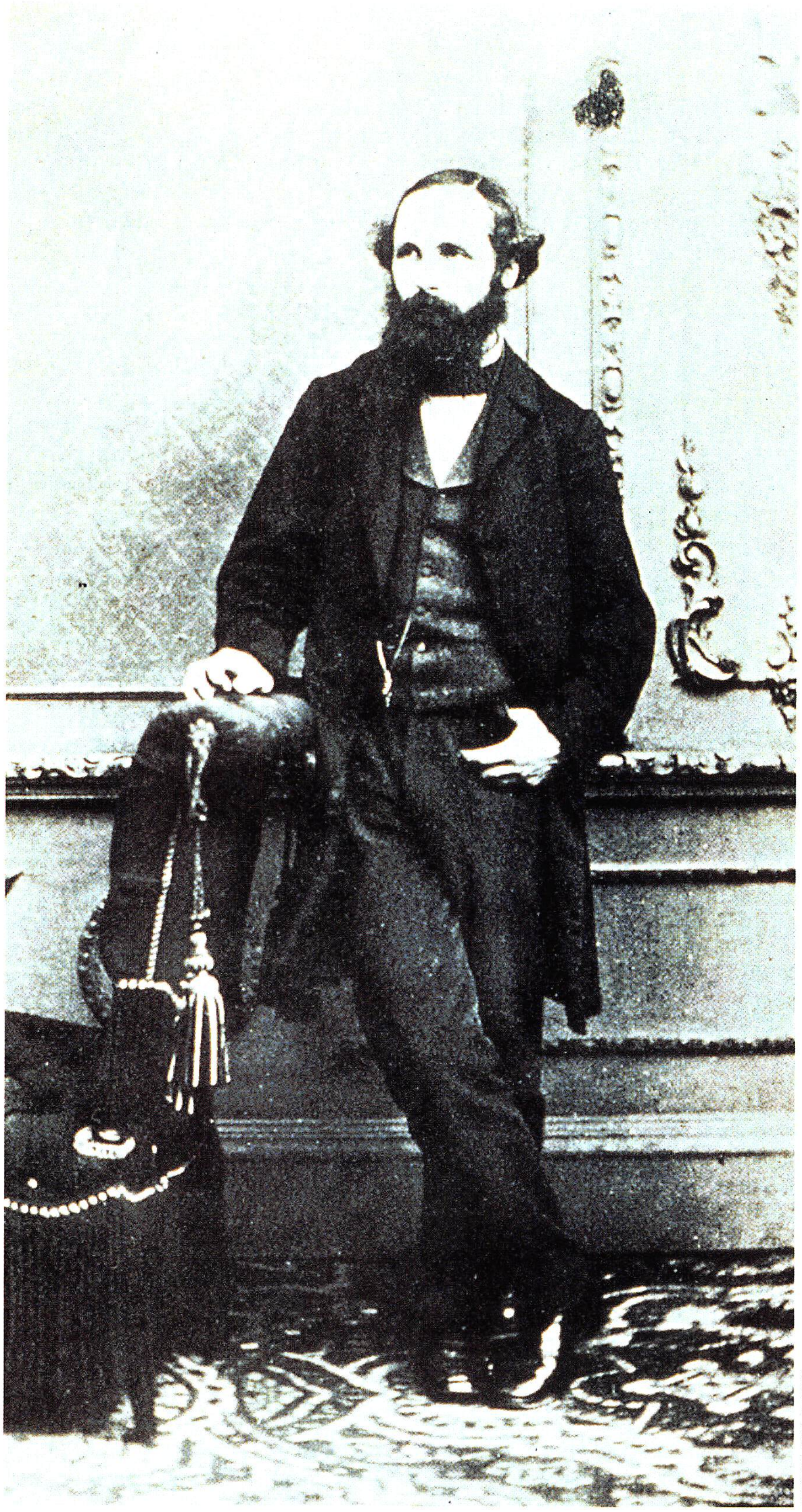
CAVENDISH LABORATORY, CAMBRIDGE

La toute première photo couleur, le ruban écossais, 1861. Maxwell utilisa trois filtres de couleurs différentes.

tard, Katherine Maxwell passa du rôle d'objet à celui de sujet de la recherche puisque c'est avec sa seule aide que Maxwell étudia les variations de la viscosité de l'air en fonction de la température, études liées à sa théorie des phénomènes de transport.

Malheureusement, nos informations concernant la collaboration de Katherine Maxwell avec son mari s'arrêtent là, et il semble bien que, si les biographes actuels mentionnent Madame Maxwell, ce soit uniquement par peur du péché de machisme. Tout au plus sait-on qu'elle était de santé très fragile, sujette à de fréquentes dépressions nerveuses et que Maxwell dut la soigner une bonne partie de sa vie, y compris durant la phase terminale de sa propre maladie. Les femmes des collègues de son mari ont fait à Katherine Maxwell une réputation d'épouvantable mégère jalouse et possessive ; mais on sait ce que vaut ce genre de témoignage. Plus révélateur est ce que Maxwell lui-même confia à certains de ses amis, leur demandant de ne pas chercher à le voir chez lui, mais toujours au laboratoire. On sait aussi qu'elle ne souhaitait qu'une chose : retourner en Ecosse et que son mari devienne un véritable "laird". Il est probable que ce désir a joué un rôle dans la décision de Maxwell de se retirer à Glenlair pendant six ans ; on peut penser que c'est aussi pour sortir de l'enfermement du tête à tête avec sa femme malade qu'il a souhaité retourner à Cambridge.

On ne s'étonnera pas dès lors que la physionomie de Maxwell telle que la révèlent les portraits soit empreinte d'un air d'insondable tristesse. De fait, la vie de Maxwell, sans être vraiment dramatique, est marquée par une suite d'événements malheureux, dont le moindre n'est pas la perte de sa mère à l'âge de huit ans. Celle-ci, comme le voulait la tradition chez les nobles de l'époque, s'était jusque-là entièrement occupée de l'éducation du jeune James. La peine causée par cette perte fut redoublée par l'arrivée d'un précepteur, véritable tyran que le jeune garçon dut supporter pendant deux ans jusqu'à ce que l'une de ses tantes ouvre enfin les yeux du père. Mais le calvaire du jeune Maxwell ne prit pas fin pour autant : envoyé à l'Académie d'Edimbourg, il fut dès le premier jour la risée de ses camarades, en particulier parce qu'il était bizarrement accoutré dans des vêtements que son père par idéalisme et conviction avait confectionnés lui-même. Maxwell, comme beaucoup de jeunes Britan-

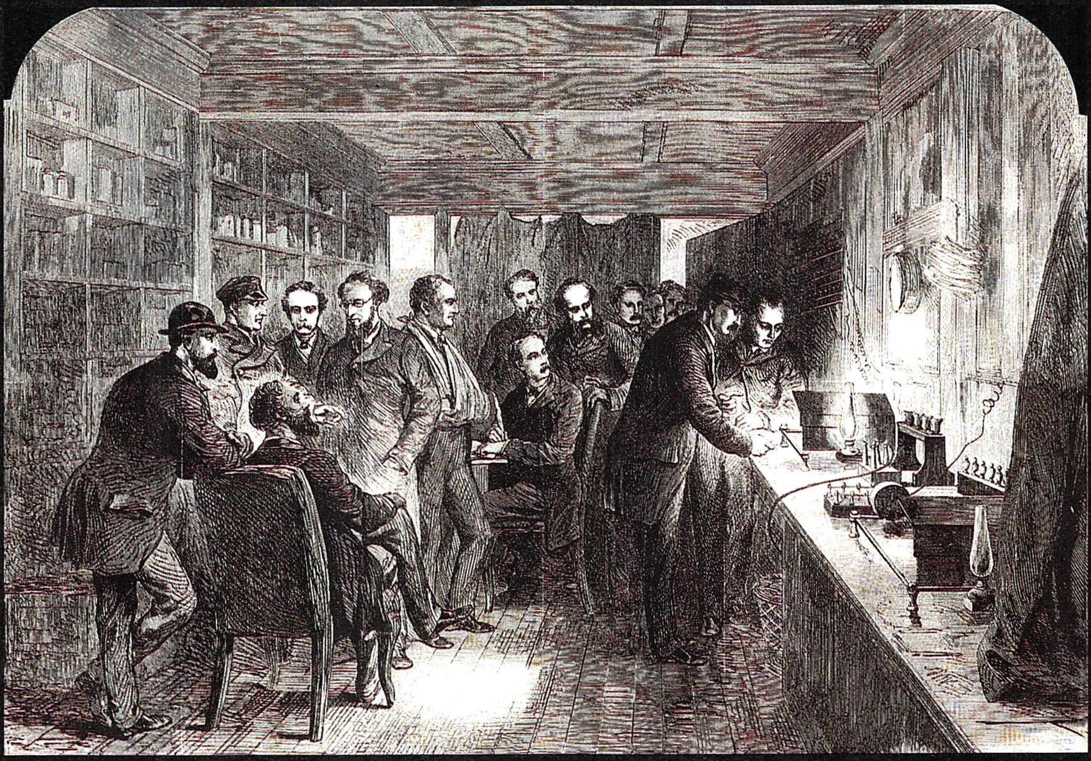

MAXWELL FOUNDATION

**M**axwell, vers 1860, à l'époque où il enseignait au King's College de Londres et où il fréquentait Faraday à la Royal Society.

niques de l'époque, vécut dans cette école deux ans d'un véritable cauchemar, que seule l'amitié de Campbell lui permit de supporter.

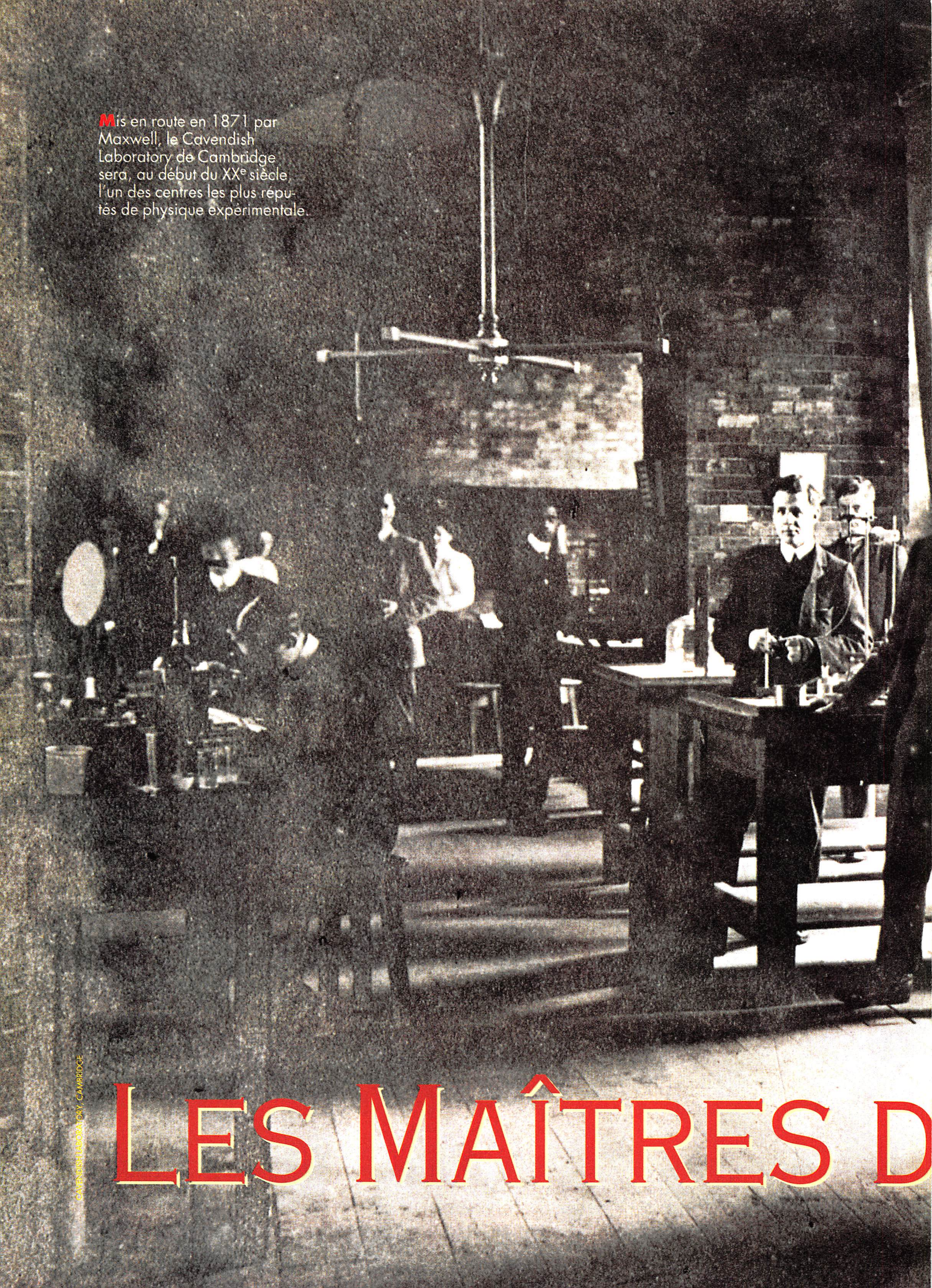
C'est dans la religion, indissociable de la poursuite de la vérité, plus ou moins consciemment limitée par lui à la pratique du physicien cherchant à déterminer les lois de la nature, que Maxwell a, tout au long de sa vie, trouvé consolation, ou plutôt une raison intellectuelle de vivre et de travailler. Fils d'un presbytérien et d'une disciple de l'Eglise épiscopale (enfant, Maxwell allait à une messe le matin avec son père et à l'autre l'après-midi avec sa tante maternelle), Maxwell n'a jamais mis en doute l'unité de ce qu'il appelle "la recherche de la Sagesse et de la Vérité" ; il a trouvé refuge contre le doute dans l'assurance que la nécessité mathématique coïncide avec la volonté de Dieu : « *Au fur et à mesure que les sciences physiques progressent, nous découvrons que les lois de la nature ne révèlent pas de décisions arbitraires et incohérentes de la Toute-Puissance, mais ne font que révéler la Sagesse et la Vérité éternelle. Lorsque étudiant les vérités de la science, nous constatons que nous ne pouvons que dire "c'est ainsi", ou plutôt : "il faut qu'il en soit ainsi car sinon ce serait contraire aux principes premiers de la vérité" – ou même lorsque nous ne pouvons que dire "cela doit être ainsi en vertu de l'analogie de la nature" –, il nous faut prendre la mesure de la grandeur de ce que nous disons lorsque nous prononçons une phrase se rapportant aux lois de la création et énonçons qu'elles sont vraies, ou justes, au regard des principes de la raison. Il est magnifique que la raison de l'homme puisse s'ériger en juge des œuvres de Dieu et puisse mesurer, peser, calculer, et dire en fin de compte "J'ai compris, j'ai découvert. C'est vrai ; c'est juste"* ». ■

# LES ACTEURS



DÈS LE DÉBUT DE SA CARRIÈRE, MAXWELL EXPRIMA LE SOUHAIT DE “FAIRE LE TOUR DE LA QUESTION DE L’ÉLECTRICITÉ”. L’UNITÉ DE SON ENVIRONNEMENT SCIENTIFIQUE SE CONSTRUIT DONC AUTOUR DES HOMMES QUI, DEPUIS UN SIÈCLE, EN THÉORICIENS OU EN EXPÉRIMENTATEURS, SE PENCHENT SUR LES MANIFESTATIONS ENCORE ÉPARSES DE CETTE ÉNERGIE INVISIBLE.

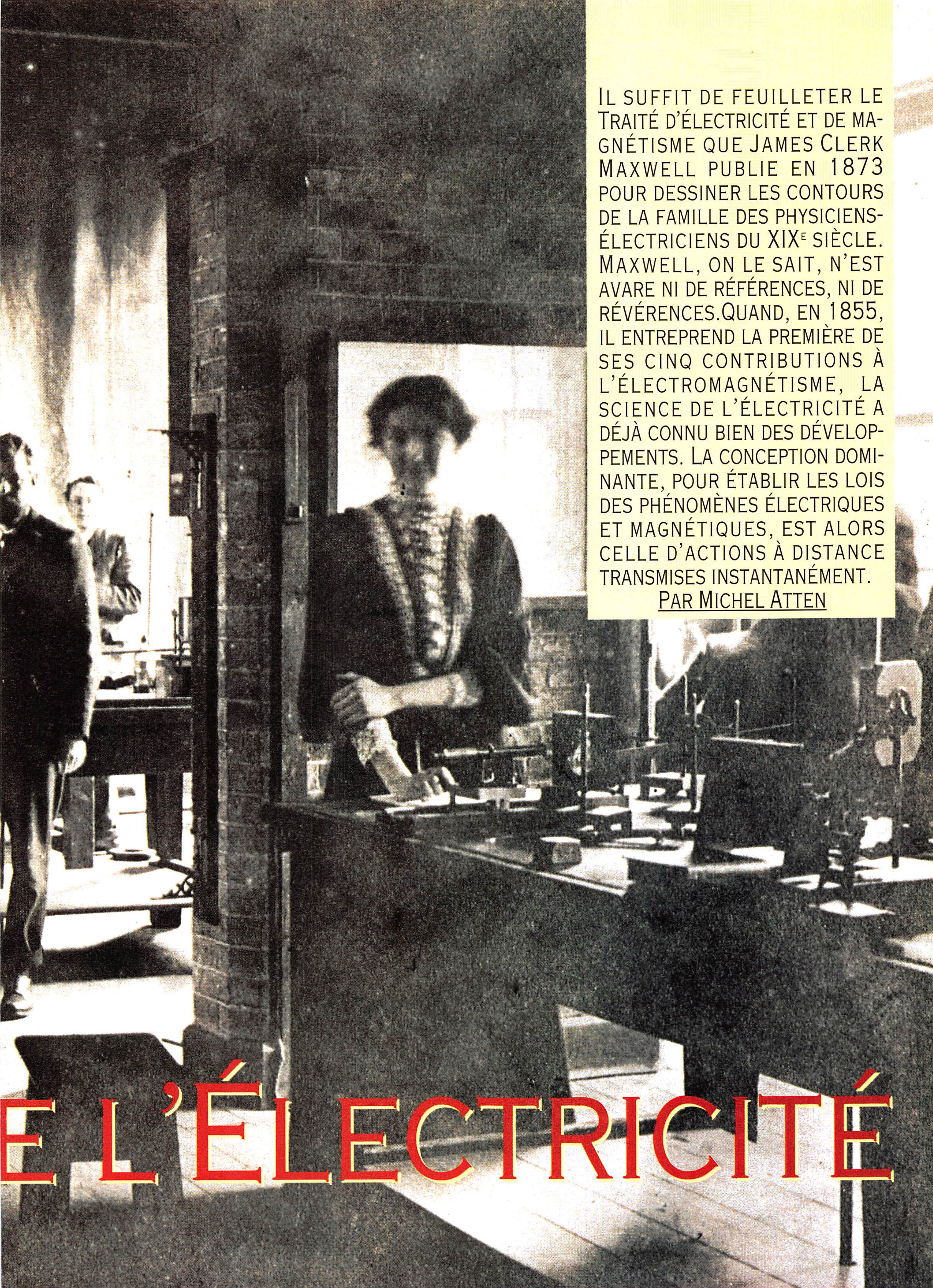
ANN RONAN P.L.



Mis en route en 1871 par Maxwell, le Cavendish Laboratory de Cambridge sera, au début du XX^e siècle, l'un des centres les plus réputés de physique expérimentale.

CAVENDISH LABORATORY, CAMBRIDGE

# LES MAÎTRES D



Il suffit de feuilleter le Traité d'électricité et de magnétisme que James Clerk Maxwell publie en 1873 pour dessiner les contours de la famille des physiciens-électriciens du XIX[e] siècle. Maxwell, on le sait, n'est avare ni de références, ni de révérences. Quand, en 1855, il entreprend la première de ses cinq contributions à l'électromagnétisme, la science de l'électricité a déjà connu bien des développements. La conception dominante, pour établir les lois des phénomènes électriques et magnétiques, est alors celle d'actions à distance transmises instantanément.

Par Michel Atten

# E L'ÉLECTRICITÉ

# 1

## LES DÉBUTS DE LA SCIENCE ÉLECTRIQUE

Les premières lois concernant l'électricité et le magnétisme statiques sont énoncées à la fin du XVIII$^{e}$ siècle, entre autres par trois Français.

Issu d'une famille de magistrats, **Charles Augustin de Coulomb** est né le 14 juin 1736 à Angoulême. Montrant de belles dispositions pour les mathématiques, il est nommé ingénieur militaire en 1761, à sa sortie de l'Ecole du génie de Mézières. En poste à la Martinique pendant neuf ans, il emploie ses loisirs à l'étude de la mécanique appliquée aux constructions. Nommé intendant général des eaux et fontaines de France en 1784, il entreprend des travaux en électricité et magnétisme. Il publie, entre 1784 et 1789, les sept mémoires qui le rendront célèbre. Il met au point une délicate balance de torsion qui lui permet de donner une forme mathématique simple aux lois d'attraction entre deux boules chargées électriquement, puis entre deux pôles d'aimant. Elu à l'Académie des sciences en 1786, il démissionne de toutes ses fonctions et responsabilités au début de la Révolution française. Il se retire à Blois et ne reviendra à Paris qu'au début du XIX$^{e}$ siècle, lors de la création de l'Institut. Il sera nommé inspecteur général de l'Instruction publique en 1802. Il meurt en 1806.

Astronome, mathématicien et physicien, **Pierre Simon de Laplace** (1749-1827) est auteur de travaux importants en mécanique céleste et en calcul des probabilités. L'étendue de ses compétences lui permet à la fois de collaborer avec Lavoisier (cf n° des *Cahiers de Science et Vie* sur Lavoisier) sur des expériences de thermochimie au début des années 1780, et de participer au développement de l'électricité et du magnétisme. Professeur de mathématiques à l'Ecole militaire puis à l'Ecole polytechnique, il est élu à l'Académie des sciences en 1774, et à l'Académie française en 1816. Il meurt en 1827. Ses contributions les plus notables en électricité et en magnétisme concernent sa formulation (dite loi de Laplace, 1820) de l'interaction entre aimant et courant électrique. Il fait progresser ce qui s'appellera la théorie du potentiel qui sera complétée par Siméon Poisson quelques années plus tard.

**Alessandro Volta**

Né à Pithiviers en 1781, **Siméon Denis Poisson** est considéré comme l'un des créateurs de la physique mathématique. Entré à l'Ecole polytechnique en 1798, il y revient comme enseignant en 1806, avant d'être nommé, en 1809, professeur de mécanique rationnelle à la Faculté des sciences de Paris . Auteur de traités sur la mécanique, la capillarité et la théorie de la chaleur, il est élu en 1812 à l'Académie des sciences. Ses principaux mémoires sur la distribution de l'électricité à la surface des corps datent de 1812-1813.

A eux deux, Laplace et Poisson ont jeté les bases d'une théorie mathématisée de l'électrostatique et du magnétisme. Mais c'est surtout l'invention par Alessandro Volta d'un artefact permettant de produire des courants à peu près permanents – la "pile de Volta" – qui va donner un essor décisif à une science nouvelle, celle des courants électriques.

**Alessandro Volta** (1745-1827) est né à Côme (royaume de Lombardie). Il enseigne la physique dans sa ville natale à partir de 1774, puis à l'université de Pavie. Volta se rend célèbre en 1782, avec l'électrophore (ancêtre du condensateur), mais c'est sa fameuse pile – la première pile électrique, faite d'un empilement de disques en cuivre et en zinc, séparés par du carton imbibé d'eau salée – qui lui apporte la gloire. Napoléon le fera comte et sénateur du royaume d'Italie. Retiré à Côme à partir de 1804, il sera nommé directeur de la Faculté de philosophie de Pavie en 1815.

SPL · COSMOS

La science électrique du XIX$^{e}$ siècle franchit une autre étape importante en 1820, avec la mise en évidence des rapports entre courants et aimants. Cette même année, au cours d'une conférence, le Danois **Hans Christian Oersted** (1777-1851) démontra la déviation, produite par un courant, d'une aiguille aimantée.

Après des études de pharmacie à l'université de Copenhague, Oersted obtient un doctorat de philosophie naturelle pour une dissertation sur Kant (1799). Il se tourne alors vers la physique, avec des travaux sur le galvanisme, l'acoustique et la compressibilité des gaz et des liquides. Après de nombreux voyages en Europe, il est nommé professeur à l'université de Copenhague en 1806. Auteur d'articles de vulgarisation, il fonde en 1824 une société savante destinée à répandre les connaissances scientifiques. En 1829, il contribue à la

**Hans Christian Oersted**

André-Marie Ampère

création d'une université technique dont il sera le président.

Les premiers pas de l'électromagnétisme sont franchis avec le calcul fait par Laplace de la force mécanique exercée par un aimant sur un circuit parcouru par un courant.La même année, Félix Savart et Jean-Baptiste Biot effectuent les mesures des champs magnétiques créés par un courant.Ce faisant, ils établissent la loi élémentaire de l'électromagnétisme.

**Jean-Baptiste Biot** (1774-1862) est fils de paysans lorrains. En conflit avec son père, il s'engage comme artilleur en 1792. Il entre en 1794 à l'Ecole des ponts et chaussées puis dans la toute jeune Ecole polytechnique. Remarqué pour ses dons en mathématiques, il est nommé examinateur à Polytechnique puis professeur au Collège de France à 26 ans. Sous l'influence de Laplace, il délaisse les pures mathématiques et se tourne vers l'application de l'analyse à la physique. Travaillant avec les plus grands savants français de l'époque, il s'intéresse aux sujets les plus divers : lumière, acoustique, galvanisme... Il cumule rapidement honneurs et places de choix : membre de l'Institut en 1803, professeur d'astronomie à la Faculté des sciences de Paris en 1808, vice-président de l'Académie des sciences en 1835, doyen de la Faculté des sciences de Paris entre 1840 et 1849. Il entre à l'Académie des inscriptions et belles lettres en 1841 et est élu à l'Académie française en 1856.

**2**

## LA SCIENCE ÉLECTRIQUE DOMINANTE

Les années 1820-1840 sont une époque d'intenses développements en Allemagne et en France, où **André-Marie Ampère** (1775-1836) est considéré comme le père fondateur de l'électrodynamique.

Né à Lyon, Ampère se montre très curieux dès son plus jeune âge. A18 ans, il connaît les principales œuvres mathématiques de son temps. Son père, juge de paix à Lyon et royaliste convaincu, est décapité en 1793. Sa mort porte un coup terrible au jeune André-Marie qui ne s'en remettra que peu à peu. Professeur de physique à Bourg (1801), à Lyon (1803), il est nommé répétiteur à l'Ecole polytechnique en 1804. Inspecteur général de l'Université en 1808, puis professeur à Polytechnique en 1809, il entre à l'Académie des sciences en 1814. Entre 1820 et 1825, il établit, à l'aide d'expériences célèbres sa loi élémentaire exprimant l'attraction mécanique entre deux fils électriques parcourus par des courants permanents : inspirée de la loi d'attraction newtonienne, la force est dirigée selon la ligne qui joint les deux éléments de courant. Cette conception d'une action électrique agissant à distance et instantanément, va connaître un grand succès. Ces travaux fondamentaux en électrodynamique, le feront élire en 1824 professeur de physique au Collège de France .

L'histoire continue : entre 1825 et 1830, l'Allemand **Georg Simon Ohm** (1789-1854) met en évidence le rôle de la résistance des conducteurs, avant d'être nommé tardivement (en 1834) professeur à l'Ecole polytechnique de Nuremberg, puis membre correspondant des Académies de Berlin et de Turin, deux ans plus tard. Malgré l'importance de la "loi d'Ohm" et bien qu'une médaille de la Royal Society soit venue récompenser son travail en novembre 1841, il lui a fallu enseigner pendant trois ans à Munich avant d'obtenir la chaire de physique à l'Université.

Toujours en Allemagne, **Franz Ernst Neumann** (1798-1895) s'appuie sur les travaux d'Ampère tout en leur donnant une forme mathématique nouvelle. En 1845, il formule la première théorie mathématique introduisant la notion de potentiel en électrocinétique, travail qui le conduit à sa théorie de l'induction (1848). Celle-ci exprime l'attraction entre deux boucles de courants fermées (ou potentiel) sous la forme d'une intégrale connue sous le nom de loi de Neumann.

Un troisième physicien allemand de renom, **Wilhelm Weber** (1804-1891), tente la première synthèse entre électricités statique, dynamique et induction. Présupposant que le courant peut être représenté sous la forme d'écoulement de particules électrisées positives et négatives, sa loi de force (1846) ajoute à celle de Coulomb un terme dépendant de la vitesse et de l'accélération de ces particules.

Weber fait partie d'une famille de scientifiques : jeune, il travaille avec son frère aîné (Ernst Heinrich) ; plus tard, avec son cadet (Eduard). Weber sera professeur de physique des universités de Halle (1828) et de Göttingen (1831). Mais, protestant contre la politique du gouvernement prussien, il sera suspendu pendant six ans de son enseignement. En 1852, alors qu'il travaille à des mesures du magnétisme terrestre, il invente un instrument qui est promis à un bel avenir : l'électrodynamomètre. Ceci en collaboration avec le maître des mathématiques de Göttingen, Gauss. Ils montrent comment les grandeurs électriques peuvent être rapportées à des unités mécaniques absolues.

**Karl Friedrich Gauss** (1777-1855) est considéré comme un des plus grands savants du XIXe siècle. Il travaille dans tous les domaines : mathématiques, géodésie, astrono-

Karl Friedrich Gauss

PALAIS DE LA DECOUVERTE

mie et physique. Son œuvre considérable inspire, de son vivant, une vénération un peu craintive. Ses capacités en calcul, extrêmement précoces – à trois ans il corrige une erreur sur la feuille de paie de son père – en font rapidement un personnage de légende. Mais son talent de mathématicien ne l'empêche pas de se pencher sur des questions très pratiques. Ainsi, en 1834, et en collaboration avec Wilhelm Weber, il met au point un appareil qui préfigure le télégraphe électrique et qui relie l'observatoire – dont il est directeur – à l'université de Göttingen – où il enseigne l'astronomie. En électricité, ses travaux les plus marquants concernent le magnétisme terrestre et les unités absolues.

C'est avec **Rudolph Hermann Kohlrausch** (1809-1858) que Weber effectue des mesures précises du rapport des unités, et une étude qualitative de l'induction électromagnétique.

Physicien expérimentateur allemand, Kohlrausch enseigne successivement à Kassel, à Marburg et à Erlangen. Outre ses travaux avec Weber, on lui doit des mesures permettant de déterminer la chute de potentiel en fonction de la longueur du fil métallique et en raison inverse de sa section, ce qui le conduit à la notion de résistivité en 1848.

Maxwell réalise une série d'expériences avec Kohlrausch, publiées en 1855. Elles leur permettent de trouver, pour le rapport des unités électromagnétiques et électrostatiques de charge, une valeur proche de la vitesse de la lumière. Ces travaux entraîneront en 1862 la mise sur pied en Grande-Bretagne, d'une commission spéciale chargée par la British Association for the Advancement of Science et la Royal Society d'établir un système cohérent d'unités, et de réaliser des mesures précises afin d'arrêter un étalon de résistance.

3

## LES AMIS ET LES MAÎTRES

C'est par son père (John Clerk) que Maxwell sera introduit dans le monde des savants écossais. Ses études dans les universités d'Edimbourg et de Cambridge lui font aussi rencontrer des hommes dont l'influence sera durable. A Edimbourg, dès le collège, il se lie d'amitié avec **Lewis Campbell** – qui deviendra un helléniste réputé et son premier biographe, et **Peter Guthrie Tait** (1831-1901), avec lequel Maxwell échange, dès la fin des années 1840, une correspondance qui durera jusqu'à la fin de sa vie. Peter Tait est mathématicien et auteur – avec W. Thomson – d'un célèbre ouvrage, *Natural Philosophy* (physique théorique), le *T. and T'.*, référence obligée de plusieurs générations d'étudiants en physique mathématique...

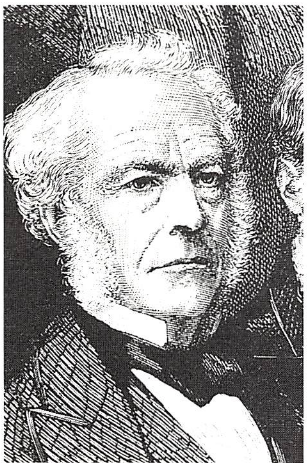
A l'université d'Edimbourg, deux professeurs ont profondément marqué l'éducation écossaise de Maxwell : James Forbes et sir William Hamilton.

**James David Forbes** (1809-1868), qui enseigne la "philosophie naturelle" (physique théorique) est physicien, et un expérimentateur efficace et très exigeant. Certains de ses travaux ont une incidence directe sur le jeune Maxwell, notamment ceux qui montrent que la chaleur rayonnante peut, comme les rayons de lumière, être polarisée, ainsi que son étude – très originale à cette époque – sur le mouvement des glaciers. Bon professeur, éloquent, il marquera Maxwell, qu'il accueille dans son laboratoire, en l'aidant à réaliser ses premières expériences sur la vision des couleurs.

Très caustique, **William Hamilton** (1788-1856) est un homme de grande érudition. Il a le don de stimuler les jeunes esprits dont Maxwell à qui il offre l'accès de sa bibliothèque personnelle. Ecarté d'Oxford, il a été avocat à Edimbourg avant d'obtenir, non sans mal, la chaire de logique et de métaphysique à l'Université. Libéral et presbytérien, sa critique du système "Oxbridge" est radicale. Son influence philosophique sera importante, particulièrement dans la Grande-Bretagne de la seconde moitié du XIXe siècle. Si Forbes développe chez Maxwell un intérêt certain pour les techniques expérimentales les plus terre à terre, Hamilton lui transmet son goût pour les visions philosophiques les plus larges.

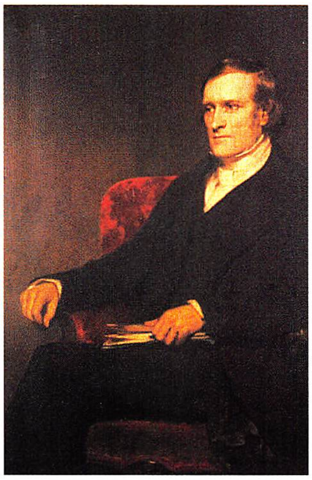
Après un bref passage à Edimbourg, Maxwell entre au Peterhouse, puis au Trinity College de Cambridge, en 1850. Là encore, deux hommes vont compter : Georges G. Stokes et William Whewell.

**Georges Gabriel Stokes** (1819-1903) n'a que trente ans quand il est nommé, en 1849, professeur de mathématiques à Cambridge. Dès 1851, il est secrétaire de la Royal Society. Célèbre pour ses travaux en hydrodynamique, pour son théorème d'analyse vectorielle, ce sont ses recherches en optique qui vont le plus influencer



ANN ROMAN P. L.

**Georges G. Stokes**



THE MAXWELL FONDATION

**James D. Forbes**

Maxwell, en particulier sa théorie ondulatoire de la lumière. Cette rencontre avec l'un des physiciens mathématiciens majeurs de l'époque permet à Maxwell, encore étudiant, de prendre connaissance des développements les plus récents de la physique. Une amitié profonde liera les deux hommes et leurs épouses respectives dans les années 1880, lorsque Maxwell rejoindra Cambridge comme professeur de physique expérimentale.

**William Whewell** (1794-1866), figure omniprésente de la vie universitaire britannique du milieu du XIXe siècle, joue un rôle déci-

sif dans la réforme des mathématiques enseignées à Cambridge. Mathématicien et philosophe, il publie de nombreux articles traitant aussi bien d'architecture, de mathématiques, de minéralogie, d'électricité, que d'économie politique ou des instruments musicaux chinois... Rompant – pour la première fois en Grande-Bretagne – avec l'inductivisme baconien, son *Histoire des sciences inductives* (1837) en trois volumes et sa *Philosophie des sciences inductives* (1840) feront forte impression sur Maxwell.

4

## LES INFLUENCES DIRECTES

Deux grands savants britanniques jouent un rôle décisif dans l'élaboration de l'électromagnétisme maxwellien : Michael Faraday et William Thomson.

Les trois volumes des *Recherches expérimentales en électricité* de **Michael Faraday** (1791-1867) constitueront le livre de chevet de Maxwell durant toute sa vie. Physicien et chimiste expérimentateur fécond, Faraday est un autodidacte d'origine très modeste. Après un apprentissage chez un relieur-libraire, il est engagé par sir Humphry Davy comme aide dans le laboratoire de la Royal Institution. De 1815 à la fin de sa vie, Faraday ne quittera plus ce laboratoire dont il devient le directeur en 1825.

Par ailleurs, Faraday appartient, comme Sarah Barnard, la femme qu'il épouse en 1821, à une petite secte protestante, extrêmement rigoriste : les sandemaniens. Il y est élu "frère" en 1841. Il en sera temporairement exclu pour avoir manqué une fois et sans raison valable le service du dimanche : il dînait avec la reine Victoria.

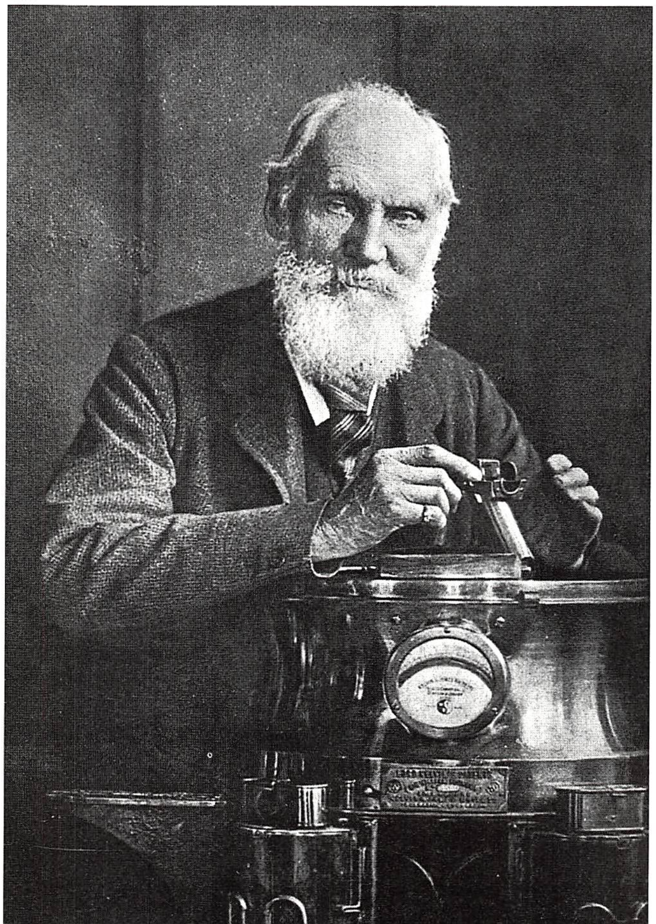
On lui doit, entre autres, la mise en évidence du principe du moteur électromagnétique, de l'induction électrique en 1831 et des lois de l'électrolyse en 1834. Au milieu des années 1840, Faraday représente de façon radicalement nouvelle le courant électrique comme une vibration produite par la tension entre les "molécules". Mais ses élaborations – purement spéculatives – ne convainquent personne.

C'est alors qu'entre en scène le second savant décisif pour l'électromagnétisme maxwellien : **William Thomson** (1824-1907). Les critiques de ce talentueux mathématicien et physicien écossais qui n'a alors que vingt-cinq ans, conduisent Michael Faraday à modifier ses conceptions.

William Thomson est un des plus célèbres physiciens britanniques du XIX$^{e}$ siècle. Après de très brillantes études à l'université de Glasgow puis à Cambridge, il est nommé à vingt-deux ans professeur de physique téhorique à Glasgow. Célèbre pour ses contributions en thermodynamique, en électricité, sur les unités électriques et sur l'âge de la Terre, il participe activement au développement de la télégraphie sous-marine transatlantique autant par des travaux théoriques que par la mise au point de divers instruments de précision. Ce qui lui vaudra l'anoblissement, sous le titre de baron. Il devient Lord Kelvin of Largs en 1892. C'est à partir de sa représentation de la force magnétique, sous forme de petits tourbillons d'éther, que Maxwell rédigera son

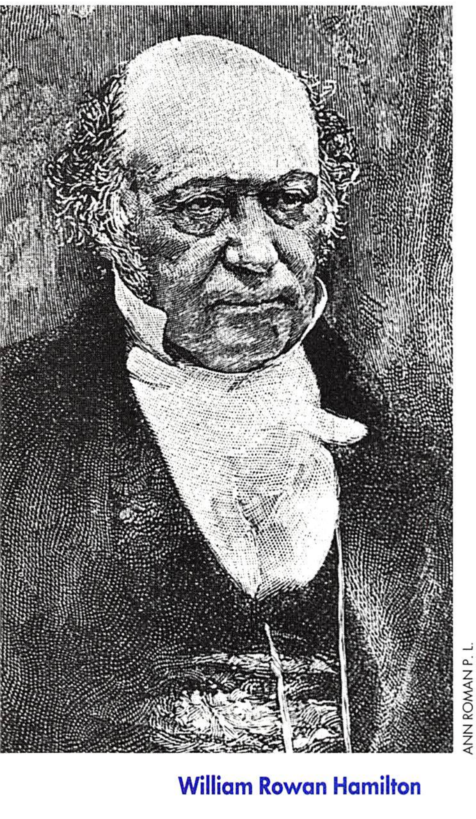
ROYAL INSTITUTION OF G.-B.

Michael Faraday et William Thomson


ANN RONAN P. L.

article de 1861-1862. Par la suite, Thomson, sera très critique à l'égard de la théorie électromagnétique de la lumière élaborée par Maxwell.

Pour diverses raisons, le grand *Traité d'électricité et de magnétisme* de Maxwell (1873), ne s'impose que tardivement comme référence obligée en matière d'électromagnétisme. Une de ces raisons tient au fait qu'il utilise une langue mathématique peu répandue : les quaternions. Cette notion mathématique – qui associe un scalaire et un vecteur – est élaborée par un mathématicien astronome et poète à ses heures, **William Rowan Hamilton** (1805-1865). Cette algèbre des quaternions, non commutative, connaîtra cependant un certain succès grâce au traité élementaire publié en 1867 par l'ami de Maxwell, Peter G. Tait.



ANN ROMAN P. L.

William Rowan Hamilton

## 5

## LES INGÉNIEURS

Au début des années 1860, alors même qu'il publie l'un de ses articles majeurs (*Sur la physique des lignes de force*), Maxwell participe à la commission spéciale sur les unités électriques. Destiné à proposer un système rationnel d'unités et des étalons fiables et reconnus de tous, le travail de cette instance intéresse aussi bien industriels et ingénieurs que scientifiques. Maxwell a ainsi l'occasion de travailler avec de grands physiciens comme avec les ingénieurs électriciens les plus réputés, tels Charles T. Bright , Cromwell Varley, ou Charles William Siemens .

Frère cadet de Werner Siemens (1816-1892), célèbre inventeur allemand qui fonde, en 1847, la maison Siemens et Halske (une des plus importantes sociétés électriques de l'histoire), **Charles William Siemens** (1823-1883) s'installe définitivement en Grande-Bretagne en 1844. Cet ingénieur inventif est l'auteur d'un fameux condensateur pour machines à vapeur et du procédé *Siemens-Martin* pour la fabrication de l'acier. Représentant la firme de son frère en Angleterre, il est un expert reconnu, y compris en électricité et en télégraphie, domaines qu'il aborde plus tardivement. Il est élu à la Royal Society en 1862 et est annobli (Sir William) en 1883, quelques mois avant sa mort.

En 1863-1864, Maxwell effectue des expériences très précises, avec **Henry Charles Fleeming Jenkin** (1833-1885) au King's College de Londres.

Après des études en Ecosse, puis à l'université de Gênes, Fleeming Jenkin est embauché comme ingénieur par un fabricant de câbles télégraphiques sous-marins de Birkenhead, la société R.S. Newall and C°. Il est un des experts auprès du Comité gouvernemental britannique chargé d'une enquête, en 1859-1860, pour la construction et la pose du premier câble transatlantique. Devenu ingénieur consultant en télégraphie, il est élu membre de la Royal Society en 1865. Nommé la même année professeur d'ingénierie à University College de Londres, il termine sa carrière à l'université d'Edimbourg (à partir de 1868). Son traité *Electricity and Magnetism*, publié en 1870, verra sa septième édition traduite par les télégraphistes français en 1884.

Maxwell et lui déterminent un étalon de résistance électrique qui permettra de définir l'Ohm.

L'influence des ingénieurs sur Maxwell, qui ne semble pas s'être cantonnée au domaine de l'électricité, demeure une question encore peu explorée.

## 6

## CONTINUATEURS ET OPPOSANTS

Si, dans les années 1860-1870, les travaux de Faraday ou de W. Thomson sont largement connus, les physiciens semblent ignorer les articles de Maxwell et continuent à travailler dans la tradition des théories de l'action à distance.

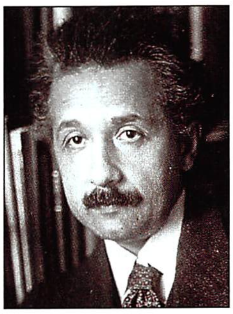
En France, **Joseph Bertrand** (1822-1900) se fait le défenseur intransigeant de la loi d'Ampère et critique le savant écossais pour son manque de rigueur mathématique.

Mathématicien très précoce, Joseph Bertrand entre à l'Ecole polytechnique à 17 ans. Répétiteur dans cette école, il est suppléant de Biot au Collège de France à partir de 1847. Cumulant les charges, Bertrand va devenir rapidement un des hommes clés des mathématiques françaises. Elu à l'Académie des sciences en 1856, maître de conférences à l'Ecole normale supérieure de 1857 à 1862, il est nommé en 1862 au Collège de France (chaire de physique mathématique et générale) tout en étant professeur à l'Ecole polytechnique. Secrétaire de l'Académie des sciences en 1873 puis secrétaire perpétuel en 1884, il est un des maîtres incontestés de la physique mathématique française. Comme tel, il fera autorité – au début des années 1870 – dans ses critiques de Maxwell et de Helmholtz qui propose en 1870 une "traduction" des résultats de Maxwell pour la Prusse.

Mais en Grande-Bretagne, l'hostilité du plus célèbre physicien de l'électricité, W. Thomson, paraît faire écran à la lecture des travaux de Maxwell. Ce n'est qu'en 1879, à la mort de Maxwell, qu'ils trouveront lecteurs, interprètes et explorateurs, dans plusieurs pays simultanément. Une nouvelle génération de physiciens s'empare alors de son œuvre dès les années 1880, à commencer par Georges F. FitzGerald

D'origine irlandaise, **Georges Francis FitzGerald** (1851-1901) enseigne la physique à l'université de Dublin. Lecteur enthousiaste de Maxwell peu après la mort de ce dernier, il est un des premiers à me-

# COLLECTIONNEZ L'HISTOIRE DES PERES FONDATEURS DE LA SCIENCE



## NEWTON
N° 13 déjà paru

## LAVOISIER
N° 14 déjà paru

## MENDEL
N° 15 déjà paru

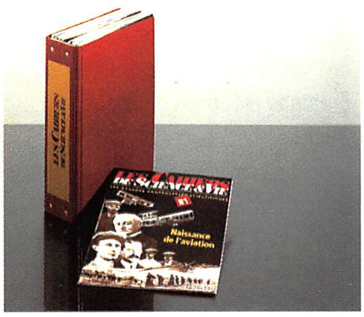
## EINSTEIN
N° 16 déjà paru

## MAXWELL
N° 17 déjà paru

## ARCHIMEDE
N° 18 parution le 16 décembre

Photos : Roger-Viollet

Elégante et pratique, chaque reliure est conçue pour classer 12 numéros des CAHIERS DE SCIENCE & VIE



## BON DE COMMANDE

à compléter et à renvoyer avec votre règlement libellé à l'ordre des CAHIERS DE SCIENCE & VIE-Bred, sous enveloppe affranchie à :
CAHIERS DE SCIENCE & VIE Service VPC - 1, rue du Colonel Pierre Avia - 75503 Paris cedex 15

**OUI** je désire recevoir la collection complète des Cahiers de Science & Vie 1993 : LES PERES FONDATEURS DE LA SCIENCE.
Les numéros déjà parus me parviendront sous trois semaines. Les numéro à venir me parviendront au fur et à mesure de leur parution.
La collection comprenant 6 fascicules coûte 160 F seulement (au lieu de192 F à l'unité chez votre marchand de journaux).

NOM ______________________ Prénom ______________________

ADRESSE ______________________

CODE POSTAL ____________ VILLE ______________________

Je commande.................. reliure(s) des CAHIERS DE SCIENCE & VIE au tarif unitaire de 65 F (Etranger : 75 FF)

Le montant total de ma commande est de........... F

Offres valables jusqu'à fin 1993 et conformes aux recommandations de la CNIL. RCS Paris B 572 134 773 CSV 17

J.L. CHARMET - BN

**Hermann von Helmholtz**

surer la masse de l'électron en 1897. Théoricien autant qu'expérimentateur, il est resté célèbre pour son hypothèse fameuse de contraction des objets en mouvement qui trouvera une explication satisfaisante dans le cadre de la théorie de la relativité.

FitzGerald fait partie de ceux qu'on a appelés les maxwelliens. On compte parmi eux : **John Henry Poynting** (1852-1914), fils d'un ministre de l'église antitrinitaire fondée par l'Italien Socin. Après des études à Cambridge, ce physicien anglais enseigne au Mason College de Birmingham, à partir de 1880. Connu pour son théorème sur la propagation de l'énergie électromagnétique (1882), il réalise des expériences démontrant l'existence d'une pression de radiation de la lumière. Il est élu membre de la Royal Society en 1905.

**Oliver Heaviside** (1850-1925) est le troisième de la bande. D'origine modeste (son père était sculpteur sur bois), Heaviside travaille plusieurs années pour une entreprise de télégraphie à Newcastle. Mais, atteint d'une surdité précoce et évolutive, il quitte son travail en 1874 et retourne habiter chez ses parents. C'est le début d'une période difficile durant laquelle il dort le jour et étudie le traité de Maxwell la nuit. Mathématicien très original (on lui doit l'invention du calcul symbolique), il établira la théorie générale de la transmission téléphonique, peu avant Vaschy en France et Lorenz au Danemark. Ignorée pendant des années, son œuvre aura une influence importante dans la Grande-Bretagne des années 1890.

Aux Etats-Unis, Henry Augustus Rowland (1848-1901) revient d'un voyage en Europe à la fin des années 1870 avec le *Traité* de Maxwell, qu'il enseigne à ses élèves.

En France, mis à part l'un des professeurs de physique de l'Ecole polytechnique, Alfred Potier (1841-1905), le monde universitaire paraît hostile ou peu intéressé. En revanche, ce sont les ingénieurs télégraphistes, Jules Raynaud et Aimé Vaschy qui, dès la fin des années 1870, s'emparent du *Traité*, le lisent, l'explorent, l'enseignent et le traduisent. Ils seront suivis par Henri Poincaré.

Tous deux issus de l'Ecole polytechnique, Raynaud et Vaschy appartiennent au corps des ingénieurs télégraphistes français.

**Jules Raynaud** (1841-1888), docteur ès-physique en 1870, est nommé professeur de mesures électriques dans l'Ecole supérieure de télégraphie (EST) en 1878, puis directeur de cette même école. Traducteur d'ouvrages britanniques, il introduit le traité de Maxwell dans l'enseignement de l'Ecole dès la fin des années 1870, avant d'être assassiné en 1888, pour une sombre histoire de brevet, par un inventeur dépité.

**Aimé Vaschy** (1857-1899), élève de la première promotion sortie de l'Ecole, est ingénieur télégraphiste et un brillant théoricien. Suppléant de Raynaud à l'EST, il le remplace dès 1888. Répétiteur de physique, puis examinateur de mathématiques à Polytechnique, il est, dans les années 1880, un explorateur popularisateur de l'œuvre de Maxwell en France.

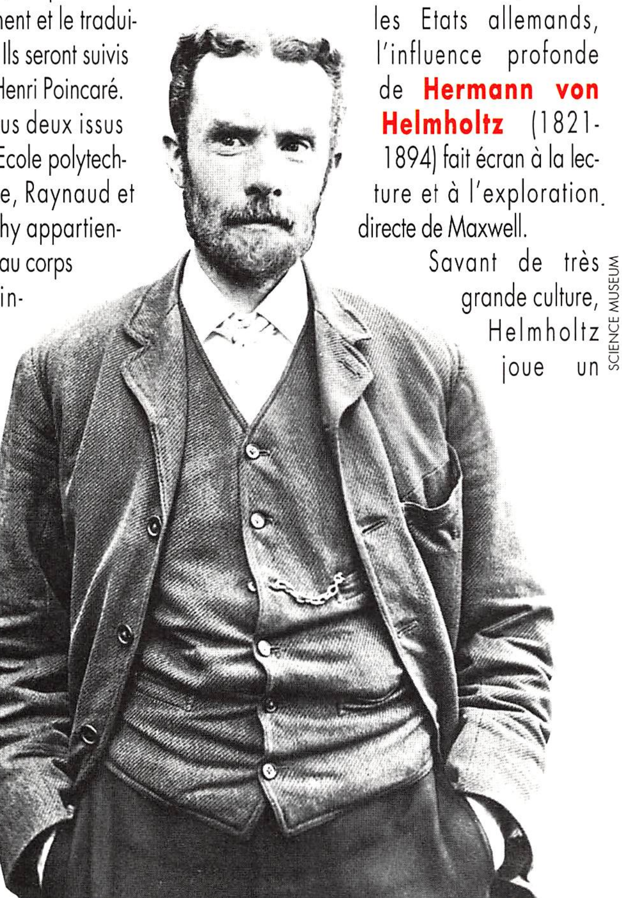
En revanche, dans les Etats allemands, l'influence profonde de **Hermann von Helmholtz** (1821-1894) fait écran à la lecture et à l'exploration directe de Maxwell.

Savant de très grande culture, Helmholtz joue un rôle important dans de nombreux domaines, du principe de la conservation de l'énergie ou de la physiologie à l'acoustique, aux mathématiques et à l'électrodynamique. Fils de professeur de lycée, il entre à l'institut Friedrich Wilhem, école de médecins militaires prussiens. Il enseigne l'anatomie à Berlin puis la physiologie à Königsberg, à partir de 1849. Professeur "ordinaire" en 1851, il enseigne successivement à Bonn et Heidelserg. Ses travaux en physique, de réputation internationale, conduisent l'Etat prussien à créer pour lui d'abord une chaire à l'université de Berlin puis un Institut de recherche, qu'il dirige jusqu'à sa mort.

En 1888, au cours d'expériences qui deviendront célèbres, **Heinrich Hertz** (1857-1894) rejette le cadre conceptuel de son maître Helmholtz et adopte celui de Maxwell.

Après des études d'ingénieur, Hertz étudie la physique sous la direction de Helmholtz à Berlin. Enseignant à Kiel (1884) puis à l'Ecole polytechnique de Karlsruhe, c'est dans cette ville qu'il réalisera les expériences en question. Expérimentateur ingénieux (il a mis en évidence l'effet photoélectrique), il est également un théoricien de premier plan : il reconstruit l'électrodynamique à partir des "équations de Maxwell" et la mécanique, à partir du seul principe de moindre action. Nommé à Bonn en 1889, il meurt dans cette ville à l'âge de 37 ans.

Ces expériences, reproduites et complétées par celles de Sarasin de la Rive en Suisse, de René Blondlot en France, Oliver Lodge en Grande-Bretagne et Ludwig Boltzmann en Autriche-Hongrie, contribueront fortement à convaincre les physiciens de se tourner vers Maxwell. ■

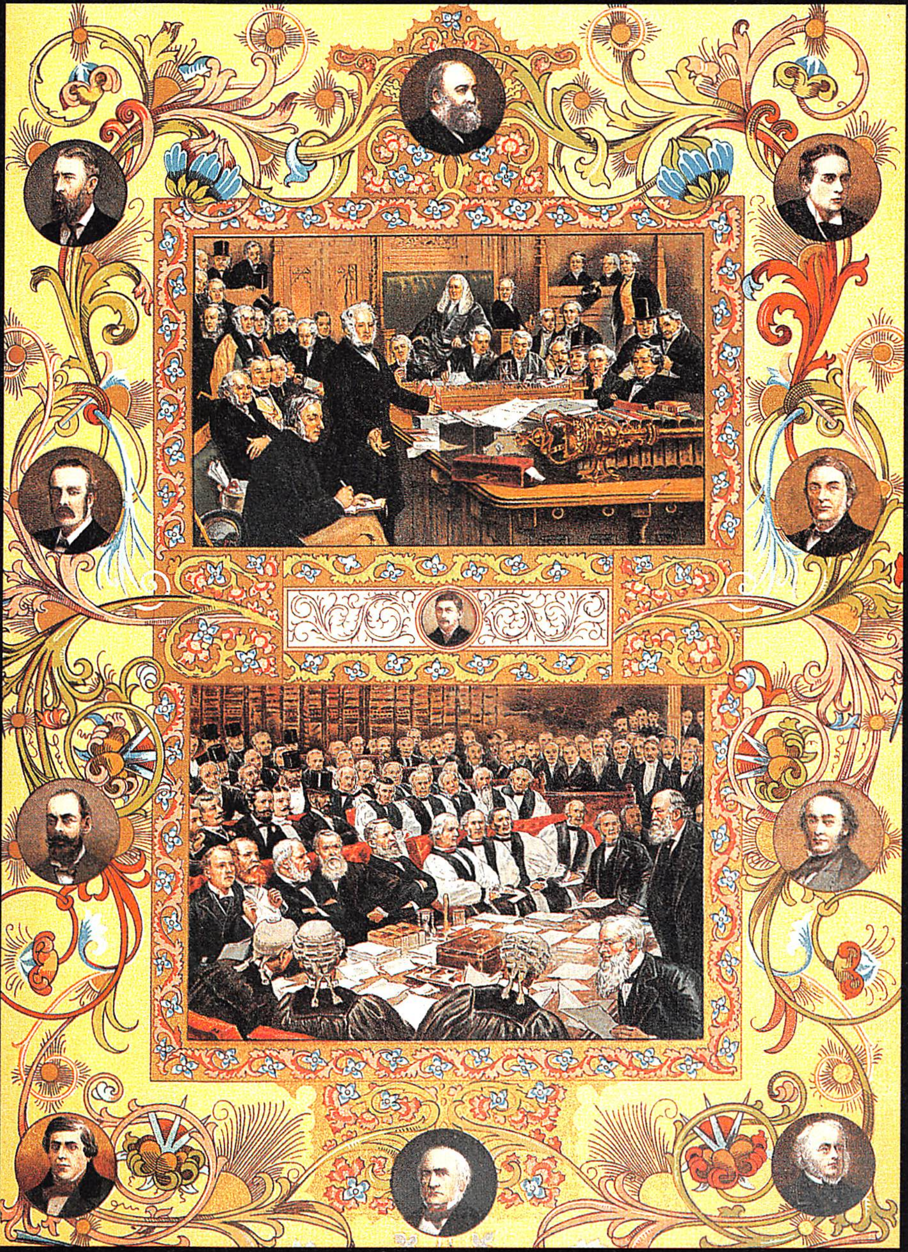


SCIENCE MUSEUM

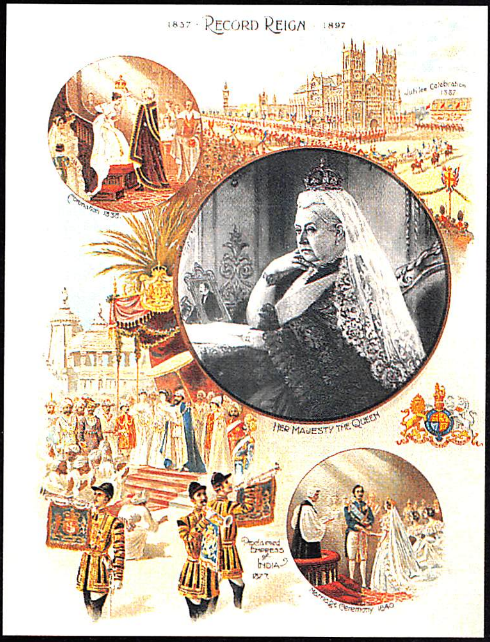
**Oliver Heaviside**

# L'AIR DU TEMPS

L'ECOSSAIS MAXWELL ŒUVRE À CAMBRIDGE, AU CŒUR INTELLECTUEL D'UN MONDE EN RAPIDE CHANGEMENT. ENTRE 1850 ET 1880, SUR L'ÎLE "ATELIER DU MONDE", DERRIÈRE LA FAÇADE DU PURITANISME SYMBOLISÉ PAR VICTORIA, S'INSTALLE UNE CIVILISATION DES MŒURS ADAPTÉE À L'ÂGE INDUSTRIEL, ET UNE CULTURE RAFFINÉE ET COMPLEXE S'ÉPANOUIT. AU MONDE DE DICKENS VA SUCCÉDER BIENTÔT CELUI D'OSCAR WILDE.


J.L. CHARMET - BIBL. DES ARTS DÉCORATIFS

**WHIGS *OR* TORIES ?**
La tradition s'est installée : au gré des élections, l'un deux grands partis, libéral ou conservateur, gouverne sous la conduite d'une série de Premiers ministres prestigieux et durables comme Palmerston, Gladstone ou Disraeli (ill. : *la Chambre des communes et la Chambre des lords*).



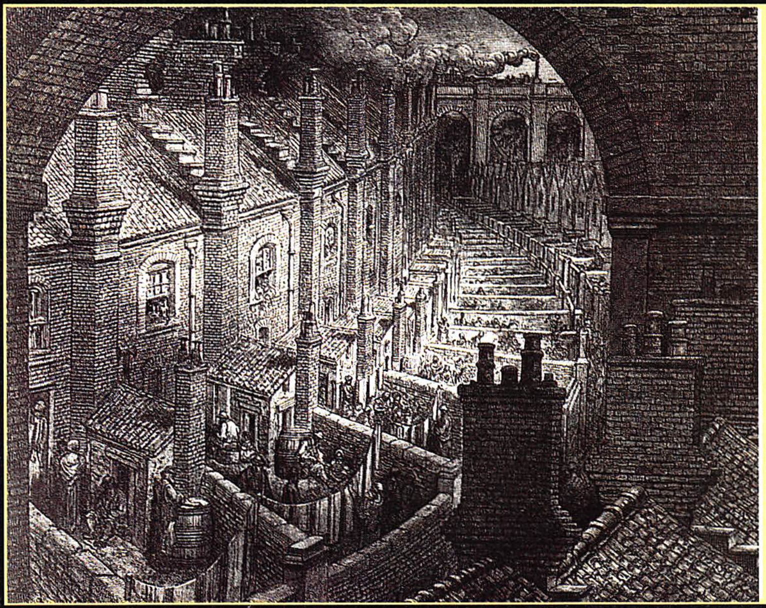
J.L. CHARMET

**VICTORIA IMPÉRATRICE.**
En 1876, le Premier ministre, Benjamin Disraeli, fait proclamer par le Parlement la reine Victoria impératrice des Indes. Elle a 57 ans. C'est l'apogée d'un long règne (1837-1901), et aussi celui de la richesse et la puissance britanniques.

ANN ROMAN P. L.

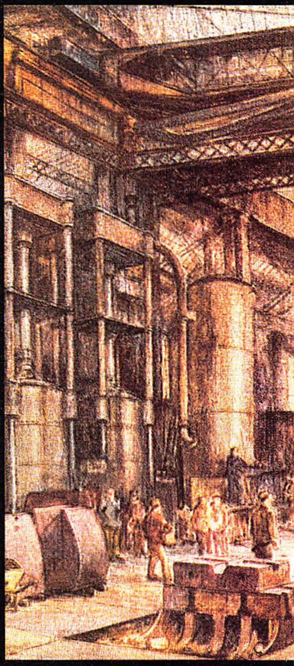
**UNE MONTAGNE DE CHARBON**
Ainsi dénomme-t-on l'île de Grande-Bretagne. Des Midlands à l'Ecosse méridionale, du pays de Galles au Yorkshire, le charbon est partout. Chevalets, terrils et cokeries quadrillent les districts miniers. Les "gueules noires" se comptent par centaines de mille.

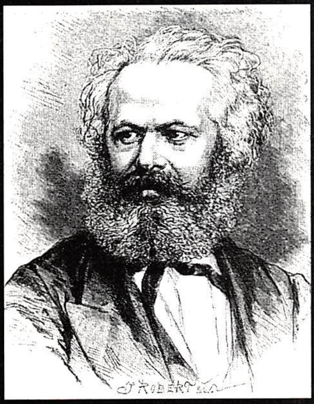
**L'ATELIER DU MONDE**
Le quart des objets manufacturés qui circulent dans le monde provient du Royaume-Uni. Dans chaque région, des usines, parfois géantes, marquent le paysage de leurs cheminées.



J.L. CHARMET - BIBL. DES ARTS DÉCORATIFS

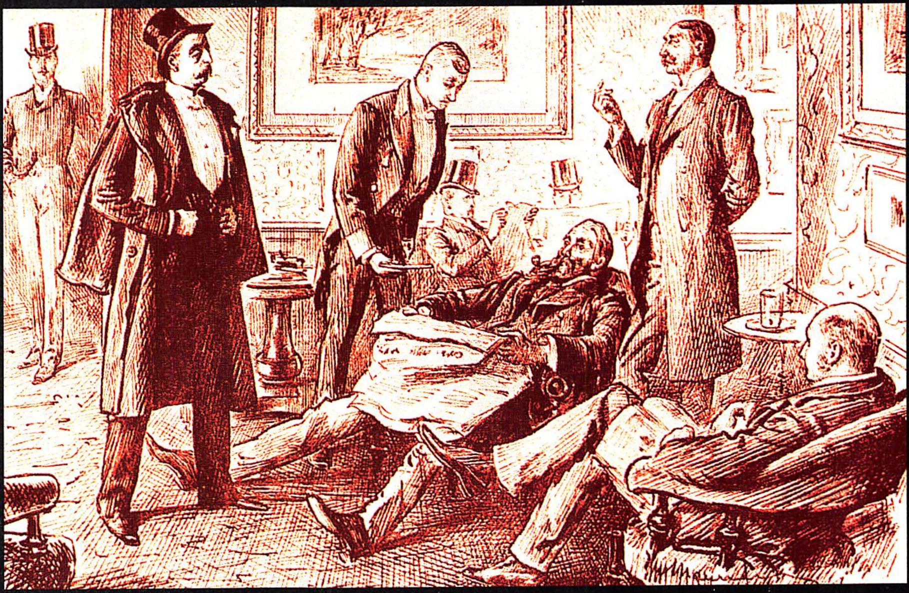
**MORNES FAUBOURGS**
Des milliers de maisons identiques, souvent misérables et sans air ou presque, abritent des familles de cinq à dix personnes. En dépit des efforts récents des municipalités et des hygiénistes, l'habitat industriel, souvent construit par les industriels et les grands *lords* maîtres du sol, offre encore le spectacle poignant des *slums* (*Gravure de Gustave Doré, 1876*).




J.L. CHARMET - L'ILLUSTRATION - BIBL. DES ARTS DECO.

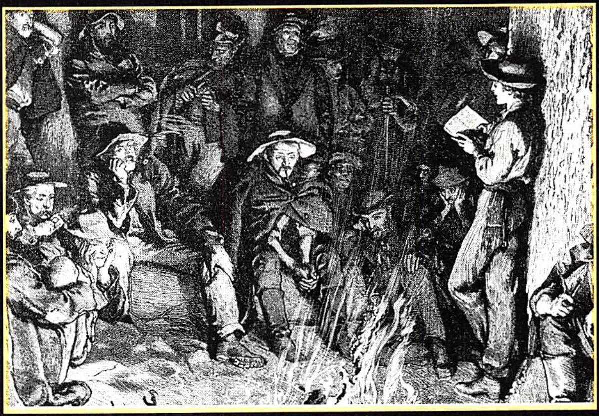
## UN LIVRE CAPITAL

Réfugié à Londres depuis 1849, Karl Marx, révolutionnaire rhénan pétri de philosophie et d'histoire, qui a contribué à la fondation de l'Association internationale des travailleurs (la I^ère^ Internationale) publie la première partie d'un épais traité : le *Capital* (1867). L'ouvrage qui dénonce le fonctionnement de l'économie industrielle moderne sera l'un des plus lus et des plus commentés dans le monde.


COLL. VIOLLET

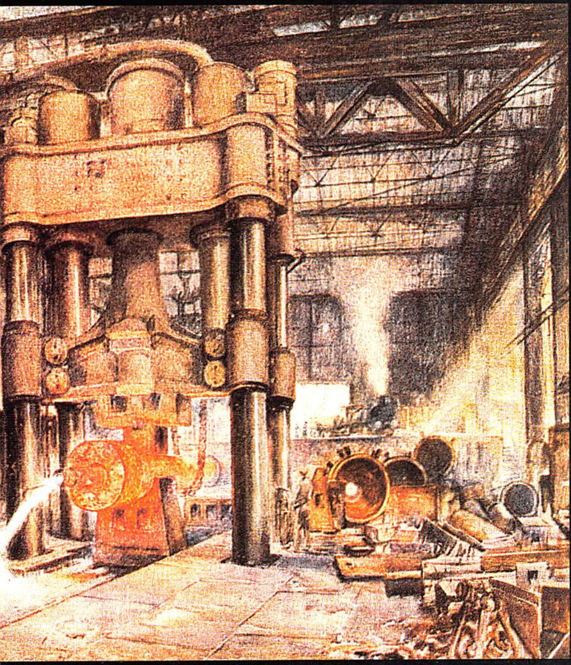
## CLUBS

Aristocrates ou petits "cols blancs" de plus en plus nombreux, étudiants ou universitaires, tous doivent s'honorer d'appartenir à un club, lieu masculin où chacun peaufine son image et cultive son statut social.


J.L. CHARMET

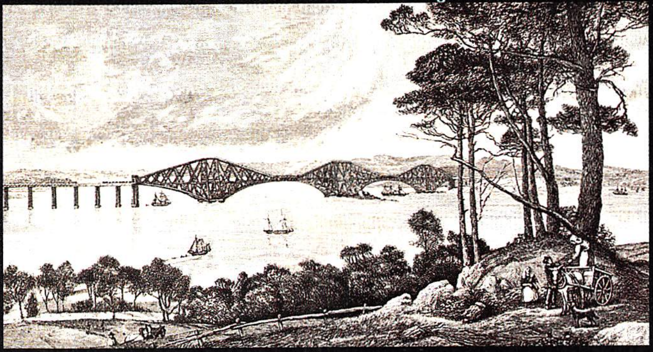
## MORT D'UN GRAND ROMANCIER

Lorsqu'il s'éteint en 1870, le créateur de David Copperfield (1850), Charles Dickens, est le Britannique le plus célèbre du monde. Londres venait de lui faire un triomphe et ses funérailles occasionnent un deuil général. Avec lui disparaît un contempteur de l'Angleterre violente de la première moitié du XIX^e^ siècle.


MARY EVANS P. L. EXPLORER ARCHIVES

## L' "EIFFEL" ANGLAIS.

Avant la France, l'Angleterre a eu son grand ingénieur de l'acier. C'est Isambart Brunel (1806-1859), constructeur du paquebot Great Eastern, mais aussi promoteur de grands ponts métalliques ou suspendus en Europe.


COLL. VIOLLET

BRIDGEMAN - GIRAUDON - COLL FARINGDON

**PRÉRAPHAÉLITES**
C'est ainsi que l'on désigne les artistes et penseurs qui, à partir de 1850, prolongent le goût post-romantique pour le Moyen Âge en une réflexion et une esthétique qui va influencer cinquante ans d'art en Angleterre et en Europe. Le poète et philosophe Swinburne réhabilite le corps féminin et passe officiellement pour "érotique" ; le critique d'art Ruskin lance le culte de Venise ; les peintres Dante Gabriel Rossetti (ci-dessus : *Pandora,* 1869) et Edward Burne-Jones rompent avec le pompiérisme de cour et mettent l'individu inspiré au cœur de leurs œuvres. Leur confrère William Morris, à la fois peintre et fondateur d'une firme de décoration, inspire le courant symboliste qui domine l'Europe des années 1880-1900. Ces artistes sont aussi des contestataires : Ruskin et Morris ont introduit les idées socialistes dans le monde intellectuel britannique.

J.L. CHARMET

**AU PAYS D'ALICE**
Depuis 1856, un professeur de mathématiques d'Oxford, Charles L. Dodgson, un diacre qui aime la photographie et a pour amies de nombreuses petites filles, se fait aussi appeler Lewis Carroll. Sous ce nom, il publie *Alice aux pays des merveilles* (1865) puis *A travers le miroir* (1872) et bien d'autres contes où l'humour et la poésie s'unissent pour créer un monde absurde et logique à la fois.

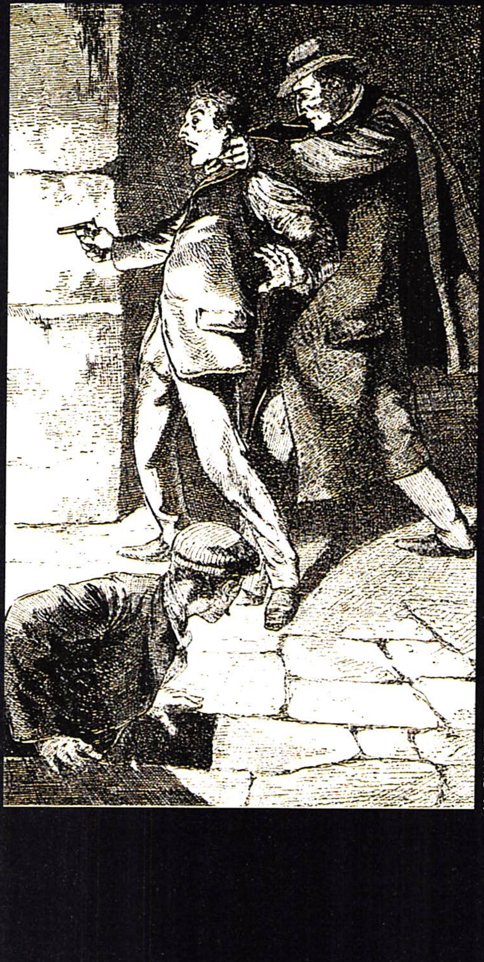
J.L. CHARMET - BIBL DES ARTS DECORATIFS

**PLEIN AIR.**
Pour fuir l'air pollué des villes, l'exercice de plein air devient luxe et mode. Mais il faut attendre 1888 pour que l'Ecossais John Boyd Dunlop (1840-1921) mette au point l'enveloppe de roue caoutchoutée qui fera de la bicyclette la "petite reine" des week-ends bourgeois.

**UN POETE EN HERBE.**
Un jeune *dandy* irlandais achève ses études à Oxford, où il est déjà un prince des élégances et des extravagances. Encore trois ans et il publiera ses premiers poèmes (1881). Son nom : Oscar Fingal O'Flahertie Wilde.

HARMET

**BAS-FONDS**
L'orée des années 1880 est agitée par les crimes sanglants de Jack l'Eventreur. L'enquête met à l'épreuve les limiers de la nouvelle police métropolitaine installée près des quais de Scotland Yard. La presse à sensation offre aux bons citoyens pudibonds du sang et du sexe à la une. Les victimes sont des prostituées des bas-fonds de Whitechapel que l'Eventreur mutile sauvagement. Tout est prêt pour qu'apparaisse Sherlock Holmes (ci-contre).



J.L. CHARMET

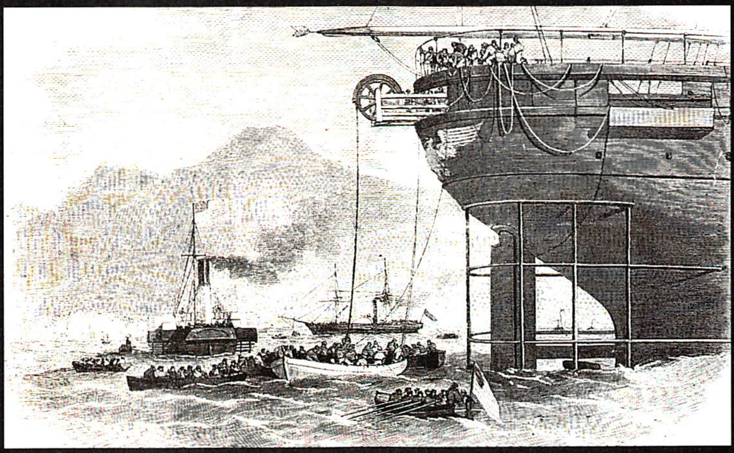
GIRAUDON - MUSEE NAT. DE CERAMIQUE, SEVRES

**LUXE DE SÉRIE**
La porcelaine se répand, puisqu'on la fait en série, avec des décors standardisés. La célèbre firme Wedgwood du Staffordshire impose dans le monde entier les tons clairs de sa "pâte de la reine", dont l'achat est un témoignage de bon goût et d'élégance.

**UN PEINTRE DE LA LUMIERE**
William Turner, ce maître de la peinture, s'éteint en 1851. Quelques œuvres majeures et tardives, comme *Pluie, vapeur* et *vitesse* (1844) où il rejette la perception verticale de la lumière, la décompose et la restitue en nappes tourbillonnantes, marqueront l'Europe de la deuxième moitié du XIXe siècle.

E. LESSING - MAGNUM - NAT. GALLERY, LONDRES

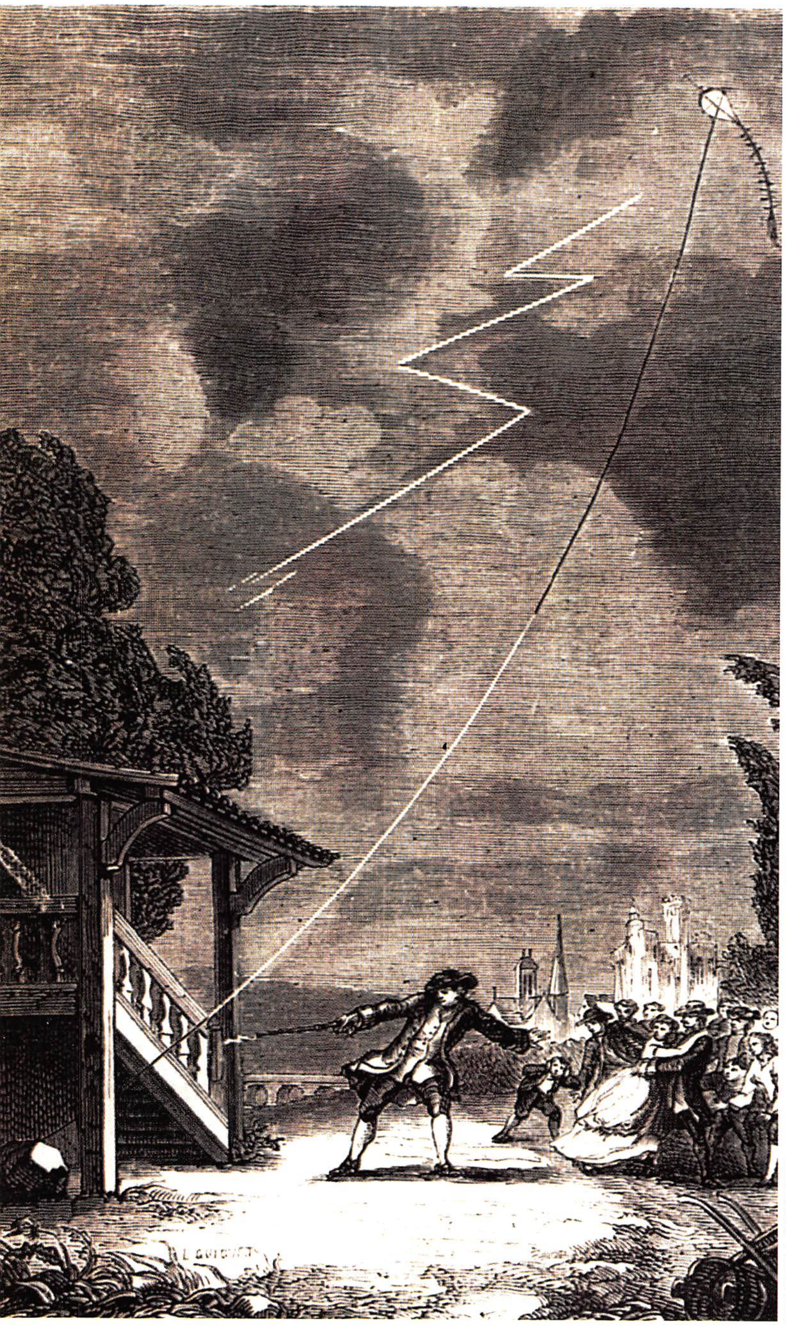
# L'Histoire



L'électricité ne fut jamais inventée, mais découverte et comprise progressivement. Un siècle avant Maxwell, ce n'était encore qu'une curiosité naturelle ; cinquante ans plus tard, une production de laboratoire. Lorsqu'il entre en scène, les machines s'en mêlent : la dynamo et le moteur à induction existent, le télégraphe se prépare. Pourtant, les effets moteurs des courants et les effets électriques des aimants sont encore une "boîte noire" qui résiste aux outils de la physique newtonienne.

MARY EVANS P. L.

# Électricité et Magnétisme : L'Union Fait la Force



Avant d'entrer au laboratoire, l'électricité fut une curiosité (cerf-volant électrique de Romas, 1753).

PALAIS DE LA DÉCOUVERTE

COULOMB, VOLTA, GAUSS, CAVENDISH, DAVY, AMPÈRE, BIOT, WEBER, VOICI QUELQUES GRANDS NOMS QUI JALONNENT L'HISTOIRE DE L'ÉLECTRICITÉ ET DU MAGNÉTISME AVANT QUE MAXWELL FASSE IRRUPTION SUR LA SCÈNE. MAIS IL EN MANQUE UN, CELUI GRÂCE AUQUEL TOUT A BASCULÉ : MICHAEL FARADAY.

PAR CHRISTINE BLONDEL

Auriez-vous aujourd'hui plaisir à recevoir des décharges électriques ? Il y a fort à parier que non. Noble ou roturier, on en fut pourtant friand avant la Révolution. Comptez les foires où, à l'aide d'une machine à frottement, chacun pouvait aller se faire électriser pour quelques sous...

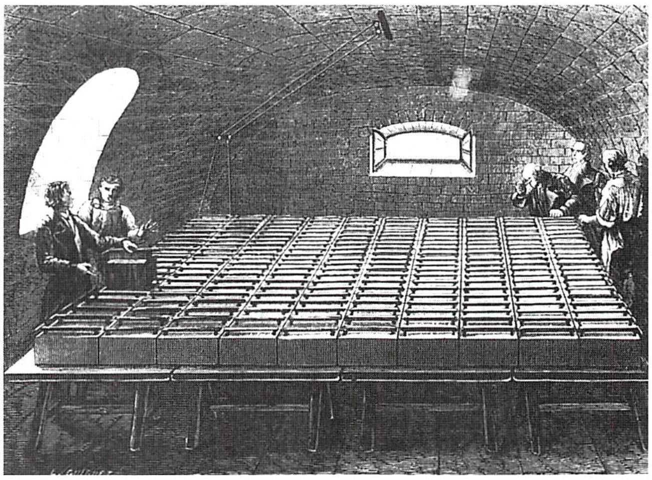
Un siècle plus tard, changement de décor. Si, aux Expositions universelles de 1889 et 1900, l'électricité fait encore sensation, ce n'est plus cette fois pour les curieux picotements qu'elle provoque, mais pour les nouvelles machines qu'elle a fait naître : éclairage, tramways et ascenseurs, téléphone... L'ère est définitivement aux piles et aux dynamos.

A cent ans d'intervalle, l'électricité n'a donc pas son pareil pour "épater" les foules. Sans doute, mais après une retraite prolongée dans les laboratoires, au cours de laquelle elle ne fait de "une" que dans la presse scientifique spécialisée... Car, télégraphe mis à part, l'électricité reste tout au long du XIXe siècle une complexe et passionnante affaire pour physiciens, chimistes, mathématiciens et physiologistes.

## Une balance pour les forces électriques

A l'époque même où Lavoisier impose l'usage systématique de la balance pour étudier les réactions chimiques, un de ses pairs à l'Académie

des sciences, l'ingénieur Charles Coulomb, dévoile un nouvel appareil pour étudier les forces électriques et magnétiques. Cette balance, affirme-t-il, permet de mesurer, par la torsion d'un fil d'argent, le plus fin que l'on sache alors réaliser, une force électrique équivalente à un poids de quelques millionièmes de gramme. En 1785, Coulomb détermine ainsi comment s'attirent ou se repoussent deux charges électriques. La force électrique décroît en raison de l'inverse du carré de la distance qui sépare les deux charges. Et il en va de même pour la force qui agit entre deux pôles magnétiques.



La première grande pile, construite en 1807, était destinée aux expériences d'électrolyse de Davy.

PALAIS DE LA DECOUVERTE

Voilà des résultats enthousiasmants au moins à Paris (à l'étranger, on est plus dubitatif car l'expérience est délicate à reproduire). Enthousiasmants, car cette loi a une forme identique à celle, newtonienne, de la gravitation universelle. Or, partant d'elle, Laplace et d'autres savants français sont en train d'élargir le domaine de la mécanique. Des masses en mécanique, aux charges dans le domaine de l'électricité, aux pôles dans celui du magnétisme, le parallélisme est parfait. Coulomb ne doute pas que les phénomènes électriques et magnétiques résultent de **forces s'exerçant à distance** et non de ces effluves ou tourbillons de matière subtile auxquels croient nombre de physiciens étrangers. L'espoir est donc grand que l'électricité et le magnétisme connaissent bientôt les mêmes progrès que la mécanique, cette science qui, au XVIII[e] siècle, a si bien réussi à expliquer tant les mouvements des corps célestes que ceux des machines humaines.

Voilà qui définit un "programme" de recherche auquel s'attellent les physico-mathématiciens Laplace et Poisson, puis l'Anglais Green et l'Allemand Gauss. L'étude de l'électricité au repos est réductible – de façon théorique – à la résolution de quelques équations mathématiques déduites de la loi de Coulomb, pour lesquelles les techniques de calcul déjà mises au point en mécanique sont applicables.

## UN COURANT PERPÉTUEL D'ÉLECTRICITÉ

A l'étranger, d'autres se sont lancés dans des voies différentes d'exploration des phénomènes électriques et magnétiques. En 1800, un professeur de physique italien, **Alessandro Volta**, présente un assemblage de disques de cuivre, argent et carton mouillé, capable de produire un "courant perpétuel d'électricité": la **première pile**. Elle est le fruit de dix années passées à tenter de reproduire, avec les techniques du physicien, les phénomènes de l'électricité animale : la contraction des cuisses de grenouille entre deux métaux que l'anatomiste Galvani avait fait connaître en 1791, et les décharges électriques des poissons torpilles.

Sans souci des mathématiques, ces travaux s'inscrivent dans une tradition de recherche sur l'électricité qui vise à découvrir des phénomènes nouveaux. Ils conduisent Volta, comme son homologue britannique Cavendish, à tenter de définir des concepts spécifiques pour les phénomènes électriques. A la déviation de l'électroscope, un appareil qui permet de faire la distinction entre charges positives et négatives, Volta associe ainsi l'idée de "degré d'électrification". Depuis longtemps, Volta est également curieux des relations entre forces électriques et affinités chimiques. En 1800, Carlisle et Nicholson découvrent l'**électrolyse**, la décomposition d'une solution chimique lors du passage de l'électricité. Des piles formées de centaines, voire de milliers de plaques métalliques, baignant dans la solution à décomposer, vont alors vite permettre aux chimistes, en particulier l'Anglais Humphry Davy, de découvrir de nouveaux éléments comme le sodium ou le potassium.

Par rapport aux physiciens français, des savants comme Volta, Cavendish ou Davy, sont sensibles aux interactions entre l'électricité et les autres domaines de la physique ou de la chimie. Ils doutent des thèses soutenues en France qui expliquent les phénomènes d'attraction ou de répulsion électrique et magnétique par l'existence de fluides impondérables exerçant des forces à distance. C'est en Angleterre, notamment de la part de Davy, que l'opposition est la plus nette. Elle porte aussi sur d'autres domaines de la physique : la chaleur par exemple, dont Rumford soutient qu'elle est due au mouvement et non au calorique de Lavoisier et la lumière, dont Young nie qu'elle résulte de l'existence des corpuscules lumineux, mais affirme qu'elle se propage par ondes dans l'espace.

Au début du XIX[e] siècle, l'électrolyse n'est pas le seul phénomène à jeter un pont entre l'électricité et les autres domaines de la physique. On découvre également que le courant électrique produit de la chaleur et de la lumière, et que la lumière elle-même peut produire des réactions chimiques.

En 1820, le Danois Hans Christian Oersted, rapporte une observation encore plus étrange : un **courant électrique est capable de faire**

**dévier une aiguille aimantée**. Cette expérience fondatrice de l'électromagnétisme crée une surprise de taille pour les physiciens français. Ils considèrent en effet le magnétisme et l'électricité comme totalement indépendants, malgré le parallélisme des expressions mathématiques de leurs forces.

Un fait en particulier est incompréhensible : la **déviation**

Le 21 juillet 1820, le Danois Hans Christian Oersted démontre qu'une aiguille aimantée est déviée par un courant électrique.

**transversale de l'aiguille**. Comment l'expliquer alors que toutes les forces connues jusque-là s'appliquent suivant la droite qui joint les éléments en interaction ? On avance alors que le passage du courant transforme le fil en aimant temporaire. L'hypothèse a un avantage : ainsi réduit à une interaction strictement magnétique, ce phénomène inconnu se trouve aussitôt ramené dans un domaine connu.

## Le Newton de l'électricité

André-Marie Ampère, professeur d'analyse et de mécanique à l'Ecole polytechnique, décide, lui, de prendre une voie différente : ramener cette interaction entre courant électrique et aimant à une pure interaction entre courants. Il montre d'abord de façon expérimentale qu'il existe **des forces d'attraction et de répulsion entre courants électriques**, pour peu qu'on rende certains éléments de circuits **mobiles**. Il suppose ensuite l'existence de courants électriques à l'intérieur de la matière des aimants permanents. Le problème est que, s'il existe une loi de Coulomb pour les forces agissant entre charges électriques au repos et une loi pour les forces entre pôles magnétiques, rien n'est connu de ces nouvelles forces entre courants. Ampère hésite longtemps entre deux types d'hypothèses. Ou bien, sur le modèle des forces gravitationnelles et de Coulomb, cette nouvelle force est une force à distance entre les éléments de courants ; ou bien les interactions entre courants sont dues à une **propagation** dans l'espace, sur le modèle de la propagation ondulatoire de la lumière dont son ami Fresnel vient de faire la théorie. Devant la difficulté de transposer à l'électrodynamique les résultats de l'optique ondulatoire, et, compte tenu de sa maîtrise mathématique des forces à distance, il opte finalement pour la première hypothèse : celle d'une force à distance s'exerçant entre éléments de courants. Il en détermine les caractéristiques. Elle est dirigée suivant la droite qui joint deux éléments de courant infiniment petits, proportionnelle à l'inverse du carré de la distance et – ce qui complique par rapport aux lois de Newton et de Coulomb – dépendante des angles entre les éléments de courants. Par le calcul, on peut théoriquement en déduire toutes les interactions non seulement entre deux circuits mais encore entre deux aimants, ou entre un aimant et un courant comme dans l'expérience d'Oersted.

Dans son *Traité d'électricité et de magnétisme*, Maxwell dira d'Ampère qu'il fut le "Newton de l'électricité". Cet hommage au fondateur de l'électrodynamique est ambigu. Car, Maxwell sait bien qu'il vient justement de renverser l'électrodynamique d'Ampère, fondée sur l'action à distance.

Après Ampère et les quelques physiciens qui, tel Jean-Baptiste Biot, cherchent également **les expressions mathématiques des forces électromagnétiques**, les deux voies précédentes, celle de la physique mathématique et celle d'une étude plus expérimentale de l'électricité se sont retrouvées. Dans cette seconde veine, de nouveaux phénomènes associant l'électricité aux autres domaines de la physique verront le jour. C'est le cas de la thermoélectricité, c'est-à-dire la création d'un courant électrique par une différence de température. Rares sont ceux qui, tel l'Allemand Wilhelm Weber effectuent des travaux expérimentaux tout en poursuivant des recherches théoriques sur la formule de la force électrodynamique dans le prolongement des travaux d'Ampère.

## Faraday : "Créer de l'électricité avec le magnétisme"

L'entrée en scène de Michael Faraday sur le terrain de l'électromagnétisme a également pour origine l'expérience d'Oersted. En 1821, nombre de théories et expériences ont été produites pour l'expliquer et la prolonger, et Richard Phillips, un ami de Faraday éditeur du *Philosophical Magazine*, lui suggère d'en faire la revue critique.

Faraday, fils d'un ouvrier forgeron du Surrey, s'est formé aux sciences, d'abord seul puis en tant qu'assistant de Humphry Davy. En 1821, il s'est acquis une modeste mais solide réputation de chimiste. C'est un homme qui, peu rompu aux techniques d'analyse mathématique sophistiquées, appuie ses conclusions avant tout sur des observations expérimentales minutieuses et de très grande qualité.

Après avoir refait l'expérience d'Oersted en en faisant varier les conditions, il invente un nouveau dispositif montrant l'interaction entre un courant électrique et un pôle magnétique isolé. Cette action se traduit par une **rotation**, **continue tant que le courant passe**, de l'aimant autour du fil conducteur ou du fil conducteur autour de l'aimant.

Un courant électrique, c'est-à-dire, pour la plupart des physiciens de l'époque, le simple contact de métaux différents, était capable de créer du mouvement. Après la formulation

par Helmholtz en 1847 du principe de la conservation de l'énergie, cette expérience sera interprétée comme une démonstration de la possibilité de l'échange d'énergie électrique en énergie mécanique. Ampère, lui, s'étonne devant cette rotation indéfinie d'un pôle magnétique autour d'un courant électrique. N'est-ce pas là un mouvement perpétuel ?

Pour Faraday, les expériences de rotation mettent surtout en question le modèle des forces émanant en ligne droite des pôles d'un aimant. C'est le phénomène de rotation d'un pôle magnétique autour d'un fil conducteur qui devient fondamental dans les interactions entre courants et aimants et non pas, comme Ampère le pensait, l'attraction ou la répulsion entre deux éléments de courants.

Pendant les dix années qui suivent, des domaines très variés de la physique et surtout de la chimie sont explorés par Faraday, parfois pour répondre à des commandes. Occasionnellement, la propagation du son dans l'air lui offre un exemple de la possibilité d'"induire" une action à travers l'espace. Les figures dessinées par le sable déposé à la surface d'une plaque métallique mise en vibration par le frottement d'un archet peuvent en effet se reproduire à la surface d'une plaque voisine, également recouverte de sable.

Son intérêt épisodique pour l'électromagnétisme a pour cadre la question de la conversion d'une force dans un autre. Oersted avait montré que le courant électrique a des effets magnétiques. Réciproquement, un aimant peut-il produire un courant électrique ? Plusieurs physiciens, dont Ampère, cherchent en vain un tel effet.

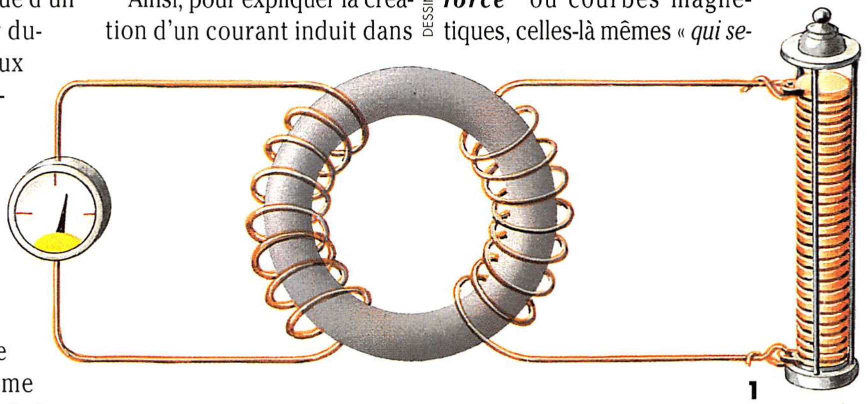
Une nouvelle série d'expériences menées par Faraday en 1831, aboutit à **la découverte de l'induction**. Au cours de l'été 1831, il construit un premier dispositif constitué d'un anneau de fer, autour duquel sont enroulés deux circuits électriques disposés face à face. Lorsque le premier circuit est mis sous tension, Faraday enregistre la production d'un courant électrique, repéré au galvanomètre, dans le second circuit. Le même phénomène se produit lorsqu'il coupe le circuit primaire, l'aiguille du galvanomètre variant, cette fois-ci, en sens contraire. Le courant électrique a donc modifié le milieu constitué par l'anneau de fer.

## LES LIGNES DE FORCE MAGNÉTIQUES

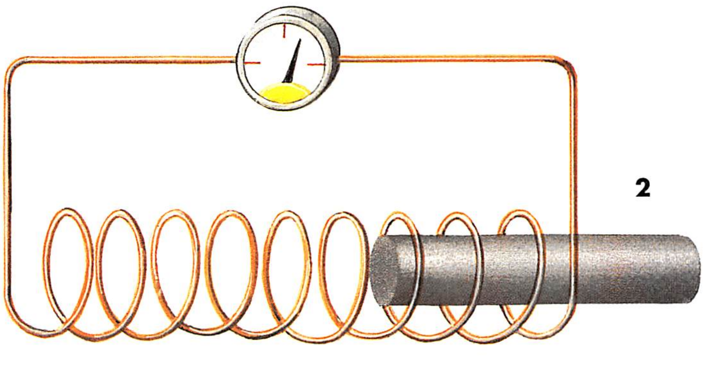
Une nouvelle question est posée et va traverser toutes ses "recherches expérimentales", ainsi que Faraday choisit désormais d'intituler ses travaux. Quelle est la relation entre la matière et les forces électriques ou magnétiques ? Et plus généralement, quelle est **la relation entre l'espace et les forces électriques ou magnétiques** ? Les tentatives de réponse de Faraday à cette question vont influencer profondément la réflexion de Maxwell. Faraday se refuse aux hypothèses de nature mécanique sur les mouvements de la matière au niveau des atomes ou sur les mouvements de l'éther, le fluide hypothétique qui remplit l'espace. Il s'en tient à l'exploration systématique des phénomènes et à une réflexion continue sur les données le plus souvent qualitatives de l'expérience.

Ainsi, pour expliquer la création d'un courant induit dans un circuit, que ce soit par l'action d'un circuit primaire dont le courant varie, ou par le mouvement d'un aimant, Faraday suggère qu'un état particulier de "tension" s'installe dans l'anneau de fer ou dans l'air, ce qu'il nomme un état électrotonique. Cette tension se manifeste suivant des ***"lignes de force"*** ou courbes magnétiques, celles-là mêmes « *qui seraient tracées par la limaille de fer, ou qui seraient tangentes à une très petite aiguille aimantée* ». Au concept purement qualitatif, Faraday ajoute que les lignes de force sont d'autant plus denses autour d'un point de l'espace que la force magnétique est intense en ce point. Il parvient ainsi à relier l'intensité du courant induit dans un circuit à une variation du nombre des lignes de force magnétique. Son intérêt se focalise alors sur le milieu qui sépare les deux systèmes – ai-

DESSIN CLAUDE LACROIX



1

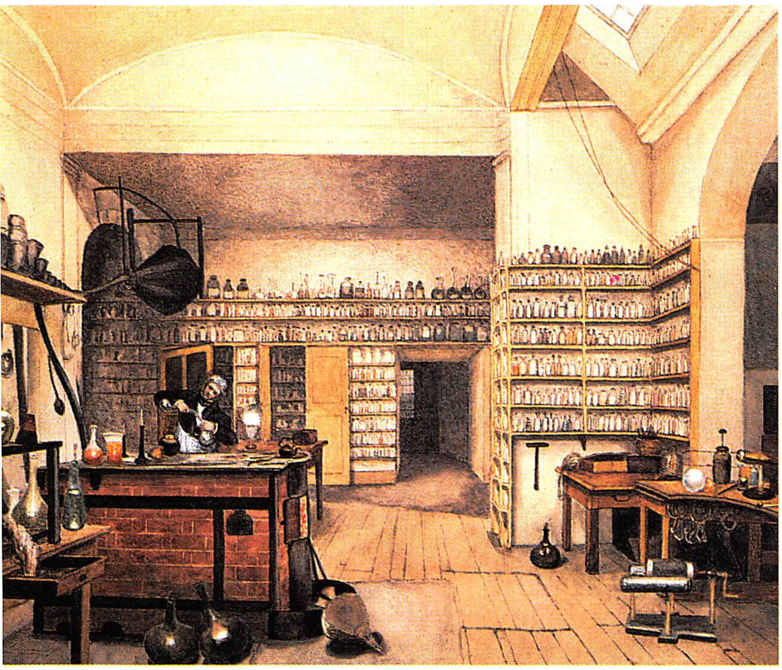


2

En 1831, Faraday découvre l'induction électrique. Dans une première expérience, il utilise un anneau de fer (**1**) porteur de deux bobinages séparés et isolés de l'anneau. Lorsqu'il ferme et ouvre le circuit électrique du premier, alimenté par une pile, il voit un courant bref apparaître dans le second. Le même courant bref se produit lorsqu'il déplace un aimant dans un bobinage simple (**2**).

mant ou courant – en interaction et sur les modifications de ce milieu. Le concept de ligne de force magnétique devient central pour Faraday et il va en étendre l'usage à l'électricité.

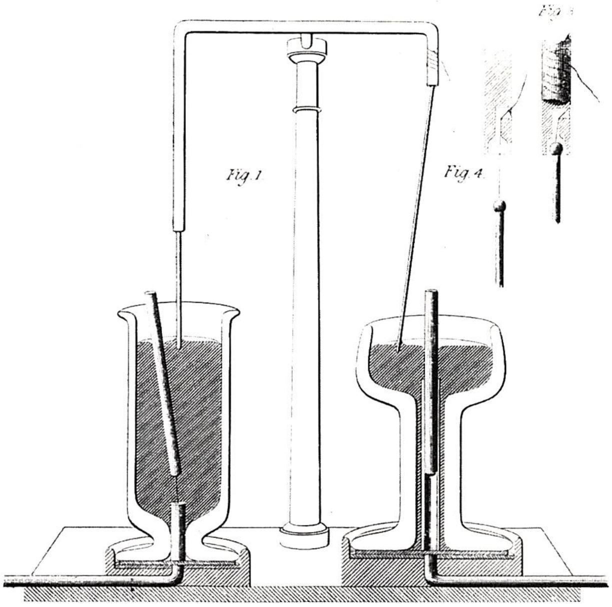
L'étude détaillée des phénomènes d'électrolyse l'amène en effet au problème parallèle de **la transmission de la force électrique à travers la matière**. Les phénomènes de l'influence électrique exercée par un corps chargé sur un autre corps, ou induction électrostatique, posent la question de la transmission à travers l'espace. Dans les deux cas, Faraday fait intervenir des lignes de forces électriques qui, le plus souvent, ne sont pas des droites. Il y voit encore un argument contre la théorie de l'action à distance : « *Je fus conduit à pressentir que l'induction électrostatique habituelle était, en général, une action entre particules contiguës et qu'une action électrique à distance n'avait jamais lieu, sauf par l'influence de la matière interposée.* » Autre élément qui sera repris par Maxwell : une ligne de force électrique exerce une action sur les particules de matière qu'elle traverse. De même qu'une ligne magnétique fait apparaître une succession de pôles nord et sud dans le fer, une ligne de force électrique crée dans un isolant une succession de charges positives et négatives. La matière isolante est ainsi électriquement "polarisée". De même que la magnétisation du fer disparaît lorsque l'aimant qui en était la cause est éloigné, la polarisation d'un isolant disparaît lorsque la ligne de force, c'est-à-dire les charges extérieures qui en étaient la cause, disparaît.


NMSI P.L. - SCIENCE MUSEUM

Faraday étudie l'interaction de l'électricité, du magnétisme, de la lumière et des corps chimiques.

La recherche par Faraday d'une vision unifiée des phénomènes électriques et magnétiques le conduisit à intervertir les vues traditionnelles sur les priorités relatives entre la matière et les forces. Les actions entre les corps sont déterminées pour lui par les forces qui remplissent l'espace entre ces corps. La matière n'est plus considérée comme constituée d'atomes entourés de vide, mais comme un *plenum* de forces remplissant l'espace.

En 1845, c'est la découverte, sur des suggestions de Thomson, d'un nouveau phénomène de relation entre deux domaines jusqu'alors disjoints, l'optique et le magnétisme, "l'aimantation de la lumière", qui ramène Faraday au magnétisme. Un rayon de lumière polarisée qui traverse un morceau de verre voit sa direction de polarisation modifiée lorsque le verre est placé entre les pôles d'un électro-aimant puissant. Ce phénomène, appelé ultérieurement la polarisation rotatoire magnétique, montrait que le magnétisme agit sur des substances comme le verre, jusqu'alors considérées comme complètement indifférentes à ses effets.



SCIENCE MUSEUM

Les cuves de Faraday : rotation d'un aimant autour d'un fil sous tension (à gauche) et d'un fil autour d'un aimant (à droite).

En suspendant, libres de se mouvoir, divers corps entre les pôles de son puissant électroaimant, Faraday découvre ensuite que certaines substances s'orientent suivant les lignes de force magnétiques tandis que d'autres s'orientent perpendiculairement à ces mêmes lignes. Mieux, les corps concentrent plus ou moins les lignes de force magnétique en déformant leur trajet. C'est pour caractériser cette interaction entre la matière et le magnétisme que Faraday introduit en 1845 le terme de "champ magnétique".

Mais il ne tranche pas entre différents points de vue sur la nature de ce que représente le "champ magnétique" dans l'espace : simple répartition de forces dans l'espace ou modification d'un éther continu ou formé de particules plus ou moins contiguës. Cela dépasse le domaine accessible à l'expérience. ■

# DECOUVREZ LE PANORAMA DE LA PRESSE SCIENTIFIQUE ET ABONNEZ-VOUS DES AUJOURD'HUI A L'UNE DE CES DEUX FORMULES :

- Tous les mois, SCIENCE & VIE vous informe parfaitement sur les derniers développements de la recherche, dans tous les domaines scientifiques. SCIENCE & VIE, le magazine d'information scientifique de référence.

- Tous les deux mois, LES CAHIERS DE SCIENCE & VIE vous font vivre l'Histoire des sciences comme on ne vous l'a jamais racontée. LES CAHIERS DE SCIENCE & VIE évoquent les pères fondateurs de la science.

- Tous les trois mois, LES HORS SERIE de SCIENCE & VIE traitent de façon exhaustive un grand sujet de notre temps. Chaque HORS SERIE fait le tour complet d'une question d'actualité scientifique.

## FORMULE N° 1

**ABONNEMENT D'UN AN AU PANORAMA DE LA SCIENCE**

12 N^os^ de SCIENCE & VIE
6 N^os^ des CAHIERS DE SCIENCE & VIE

**333 F** seulement
au lieu de 456 F *

## FORMULE N° 2

**ABONNEMENT D'UN AN AU MAXI PANORAMA DE LA SCIENCE**

12 N^os^ de SCIENCE & VIE
6 N^os^ des CAHIERS DE SCIENCE & VIE
4 N^os^ HORS SERIE de SCIENCE & VIE

**398 F** seulement
au lieu de 556 F *

## BULLETIN D'ABONNEMENT PRIVILÉGIÉ

à compléter et à retourner avec votre règlement à l'ordre de SCIENCE & VIE-Bred, sous enveloppe affranchie à :
SCIENCE & VIE - Service Abonnements - 1, rue du Colonel Pierre Avia 75503 Paris cedex 15.

**OUI**, je m'abonne pour un tarif privilégié au PANORAMA DE LA SCIENCE
et je choisis la formule suivante :

- ❑ CJWA — **FORMULE N°1 : PANORAMA DE LA SCIENCE** (18 N^os^)
  **333 F** seulement au lieu de 456 F * / **123 F** d'économie

- ❑ CHWZ — **FORMULE N°2 : MAXI PANORAMA DE LA SCIENCE** (22 N^os^)
  **398 F** seulement au lieu de 556 F * / **158 F** d'économie

Nom ______________________

Prénom ______________________

Adresse ______________________

Code postal __________ Ville ______________

* prix de vente chez votre marchand de journaux
Offres valables jusqu'à fin 1994, conformes aux recommandations de la CNIL et réservées à la France métropolitaine. Autres lieux de résidence : Nous consulter au 46 48 47 08. RCS Paris B 572 134 773

CSV 17

# UNE THÉORIE EN QUA

Autour d'aimants, la limaille de fer dessine de fascinantes figures. Un célèbre artiste contemporain, Takis, en a fait le sujet de cette œuvre de la fin des années 60 : Festin magnétique.

D. MALARTRE - EXPOSITION GAL. NAT. DU JEU DE PAUME

# ATRE LIGNES

"La théorie de Maxwell, ce sont ses équations". Celui qui s'exprime ainsi en 1892 n'est autre que Heinrich Hertz, le découvreur des ondes radio. Et personne n'a su le contredire depuis. Les quatre lois établies par Maxwell en 1868 restent en effet à l'univers impalpable des charges électriques ce que sont les lois de Newton a tout objet pesant : en décrivant les propriétés fondamentales des phénomènes électriques et magnétiques, en les liant entre eux par des rapports de quantité, elles tracent les limites d'un nouveau champ, celui des phénomènes électromagnétiques. Lumière comprise.

Par Gérard Chevalier

L'électrodynamique affiche clairement son objet d'étude : cette branche de la physique met en jeu des charges électriques et traite de leur dynamique (l'étude des forces qui les mettent en mouvement, selon la définition admise depuis Newton). Dans la théorie newtonienne de la gravitation, à tout "corps", on associe une masse **m**. Coulomb s'est aperçu qu'on pouvait aussi y associer une charge électrique **q**. Mais, à la différence de la masse, la charge possède un "signe", elle peut être positive ou négative (quand elle est nulle, le comportement du corps ne concerne pas l'électrodynamique...).

La force qui s'exerce sur un corps électriquement chargé, placé à un instant donné en un point quelconque de l'espace, dépend de sa charge q, de sa vitesse v, et de deux variables : les champs électrique (**E**) et magnétique (**B**), au point où se trouve la charge. Ainsi, la force F est donnée par une formule simple : $F = q\,(\mathbf{E} + v \times \mathbf{B})$. De cette façon, l'électrodynamique se ramène à une question : déterminer les caractéristiques **générales** du comportement des champs électriques et magnétiques. Extraire de l'apparent magma des divers phénomènes électromagnétiques un ensemble fini de caractéristiques : telle est la beauté de l'œuvre de Maxwell, résumée dans ses fameuses équations.

Les voici telles qu'on peut les rencontrer dans la littérature scientifique d'aujourd'hui [1]:

$$\nabla .\, \mathbf{E} = \rho/\varepsilon_0$$
$$\nabla \times \mathbf{E} = -\,\partial \mathbf{B}/\partial t$$
$$\nabla .\, \mathbf{B} = 0$$
$$c^2\, \nabla \times \mathbf{B} = \partial\, \mathbf{E}/\partial t + \mathbf{j}/\varepsilon_0$$

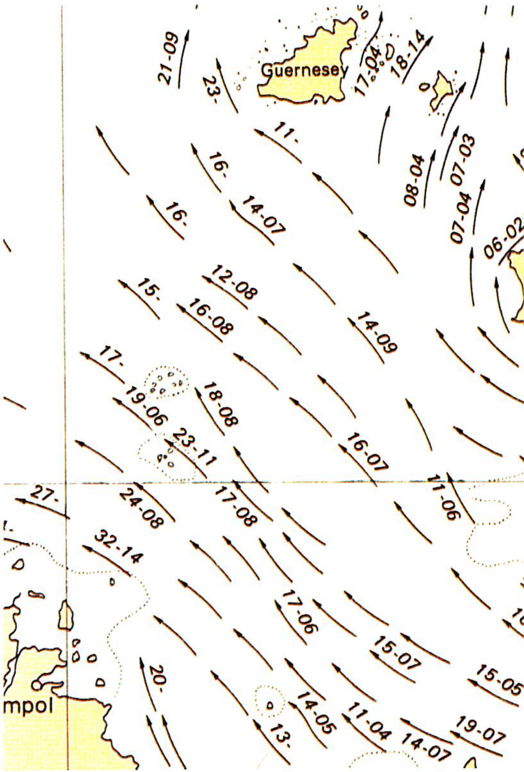
Face à cet ensemble de signes, le profane est comme Champollion devant les hiéroglyphes égyptiens : la signification échappe. De plus, si ces quatre lignes condensent effectivement toutes nos connaissances sur les phénomènes électromagnétiques de l'univers, on peut craindre que ce grand œuvre soit réservé aux seuls initiés. Prendre la fuite, les déclarer incompréhensibles *a priori,* serait d'autant plus facile que les équations de Maxwell ne sont même pas évoquées dans l'enseignement secondaire français...

Foin de ces effarouchements ! La préparation du baccalauréat est le cadet de nos soucis... Humer un peu du parfum de ces équations nous suffira... Il reste bien sûr leur symbolisme mathématique... N'y attachons pas trop d'importance. Somme toute, il s'agit seulement d'outils mis au point par les physiciens pour s'éviter d'écrire de longues périphrases : de commodes substituts, derrière lesquels se cachent, en définitive, des mots...

Au sein de ces lignes, quatre signes d'égalité indiquent que nous avons affaire à quatre équations. Deux lettres y apparaissent abondamment : **E** et **B**. La première représente le champ électrique, la seconde le champ magnétique. Au cœur de l'électromagnétisme figure donc le mot **champ**. Si nous le prenons dans son acception habituelle, il signifie un espace cultivé caractérisé par les lignes qu'y a creusées le laboureur : ce qu'un martien, ignare en agriculture mais féru d'approches conceptuelles, appellerait un espace **géométriquement** organisé.

La scène originelle de l'électromagnétisme se joue à trois acteurs : un aimant, de la limaille de fer, et un digne savant anglais nommé Faraday. La mise en scène est connue : jetée en vrac autour de l'aimant, la limaille de fer s'organise et dessine des **lignes courbes** qui, partant d'un pôle de l'aimant, finissent par rejoindre l'autre pôle. Faraday interprète la scène : la limaille sert de révélateur à une organisation géométrique de l'espace, que d'aucuns, jusqu'alors, avaient pu croire inerte. Sur le papier, à la manière d'un cartographe traçant des lignes de niveaux, il peut représenter le champ. Il peut d'abord dessiner sa **direction** en suivant l'orientation de la limaille. Il peut ensuite se faire une idée de son **intensité** : les lignes sont espacées quand le champ est faible, serrées quand il est fort. Voici donc une représentation fort utile pour se "figurer" le champ. Elle est malheureusement trop simple. Pour deux raisons: 1/ elle ne permet de visualiser qu'un plan, celui qui supporte la limaille, alors que Faraday sait qu'il faudrait prendre en compte **tout** l'espace ; 2/ elle est statique : elle saisit le champ, comme un instantané photographique. On soupçonne immédiatement que l'introduction de la troisième dimension et/ou du mouvement va considérablement compliquer les choses. Et que dire, si l'on superpose un second aimant au premier etc. ? D'où l'absolue nécessité de passer par des **grandeurs capables de caractériser des champs complexes** et par un formalisme mathématique abstrait. Faraday passe le relais à ses successeurs, Thomson et Maxwell...

Mathématiquement parlant, un champ se définit désormais comme une **grandeur physique qui prend une valeur en tout point de l'espace**. Ces derniers mots sont fondamentaux : ils impliquent en effet que l'espace est **continu**. Ceci cristallise la nouveauté introduite par Faraday et Maxwell dans la physique. Cette continuité de l'es-




SHOM, PARIS

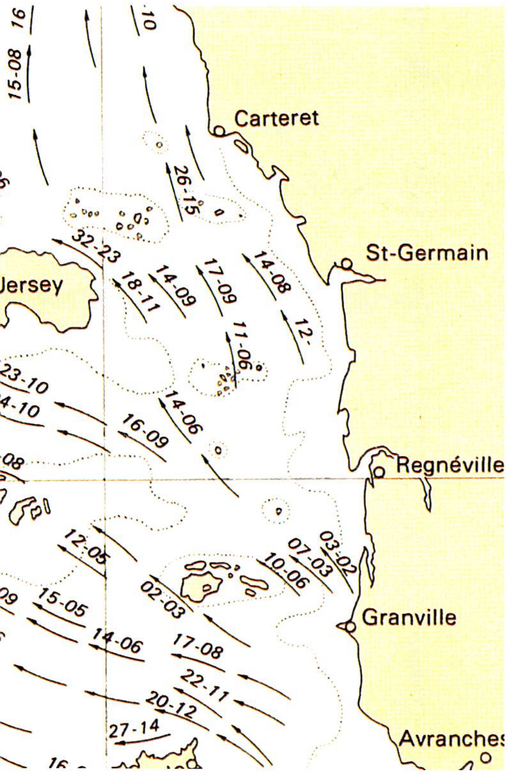
pace s'oppose en effet à la discontinuité incluse dans la vision newtonienne du monde : chez Newton, la force de gravitation relie deux corps situés à distance l'un de l'autre (deux points matériels, discontinus), mais l'espace (continu) qui les sépare n'a aucune importance dans l'édifice théorique (cf. p. 45 des *Cahiers de Science et Vie* n°16, consacrés à Einstein). L'approche est radicalement novatrice...

Prenons un modèle type de "milieu" continu : un fluide, et pour simplifier un fluide enfermé dans un récipient. Dans un tel milieu, rien n'interdit de définir la température T comme un "champ". On peut l'écrire T(x, y, z, t) pour signifier qu'elle dépend de la position repérée par (x, y, z) à l'instant t. A son propos, on parlera de champ **scalaire** : en un point, une seule valeur ("tant" de degrés, par exemple) suffit à le définir.

Considérons maintenant que le fluide, de l'eau par exemple, s'écoule, et intéressons-nous à la vitesse de cet écoulement en tout point. Précisons ceci, une nouvelle fois : bien que nous sachions que l'eau est formée de molécules, ce ne sont pas les vitesses de ces molécules (discontinues) qui nous intéressent. Nous adoptons ici une vision "de haut" (continue) du phénomène et sommes concernés par les valeurs d'une grandeur physique : la vitesse de l'écoulement, en tout point de l'espace (celle d'une molécule quand elle est en ce point). On obtient ainsi un **champ de vitesses** (les marins naviguant dans la Manche sont familiers de telles représentations à travers les cartes des courants de marée). La grandeur qui nous intéresse n'est donc plus un scalaire, un seul nombre, mais un vecteur : la "longueur" de la "flèche" – son module– et son orientation sont nécessaires pour caractériser une vitesse. Le champ de vitesses est naturellement appelé un **champ vectoriel** : une catégorie à laquelle appartiennent également les champs électrique et magnétique, **E** et **B** (2), qui nous intéressent ici. Les champs de vecteurs offrent un incomparable avantage, il est aisé de superposer deux configurations : il suffit d'additionner les vecteurs-champs de l'une et de l'autre, une opération impossible avec les dessins des lignes de champ... Ce principe de superposition distingue également les champs des particules : s'il peut y avoir plusieurs champs en un même point, plusieurs particules n'occupent jamais la même position dans l'espace.

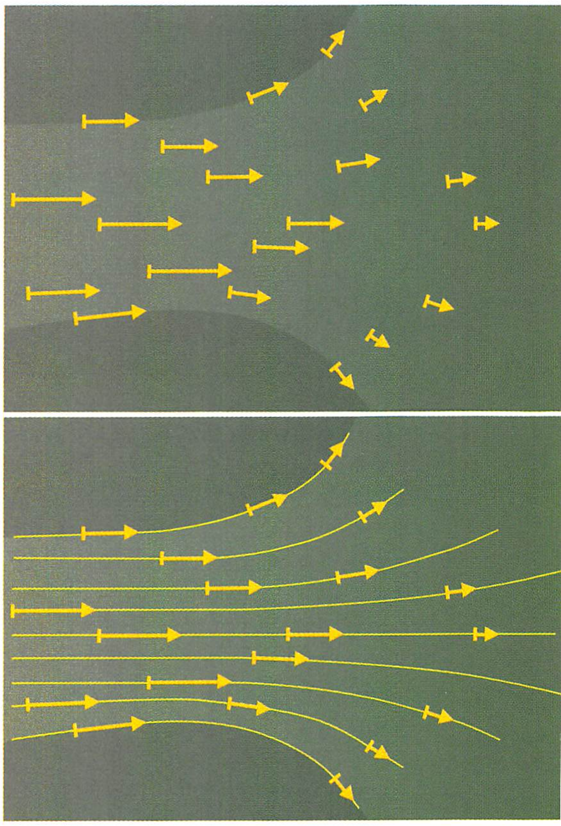
Pour élaborer les propriétés mathématiques de ces champs **E** et **B** , pour décrire la façon dont l'espace s'organise autour d'une charge électrique ou d'un aimant, immobile ou en mouvement, Maxwell s'est servi de cette **ana-**

Carte des courants de marée, trois heures après la pleine mer de Saint-Malo.




1 – Le texte de Norton Wise présente une formulation encore plus ramassée, plus" symétrique" des équations de Maxwell, mais aussi plus difficile à "faire parler" que celle que nous avons choisie ici. Pour de plus amples développements, on pourra se référer au cours de physique de Richard Feynman, *Electromagnétisme* 1, InterEditions 1979, auquel ce texte doit beaucoup.

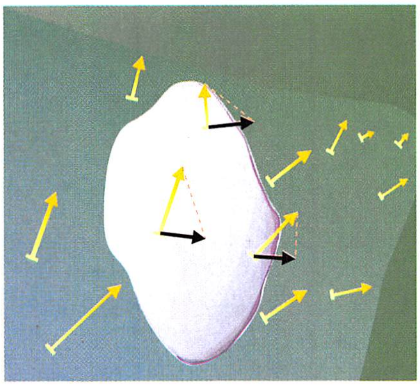
2 – Dans les équations, la notation **E** sous-entend que le champ électrique est un champ vectoriel, et elle omet qu'il est défini en tout point de l'espace et à chaque instant ; écrire **E** (x, y, z, t) serait indéniablement plus lourd.



DESSIN D. GALLAND

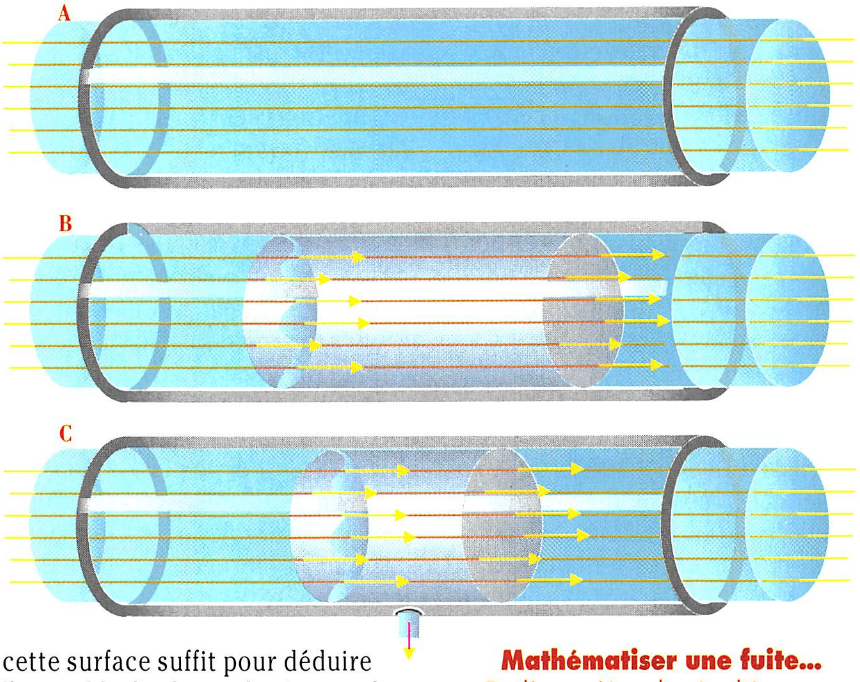
**Champ de vecteurs**

Considérons un écoulement de fluide. A un point de l'espace, on peut associer une vitesse : celle qu'a une molécule d'eau lorsqu'elle se trouve en ce point. Sur le dessin supérieur, le point de départ de chaque flèche, sa longueur et sa direction définissent un vecteur-vitesse. Par commodité, on n'a représenté qu'un plan de l'espace et seulement quelques vecteurs ; mais Faraday et Maxwell adoptent une vision continue des phénomènes. En attribuant un vecteur à tous les points de l'espace, ils donnent naissance à un nouvel être de la physique mathématique : le champ vectoriel. Le dessin inférieur montre une représentation géométrique d'un champ de vecteurs : les lignes de champ sont, en tout point, tangentes au vecteur du champ (ici, un champ de "vitesses"). Par ailleurs, la densité des lignes de champ peut donner une idée de l'intensité du vecteur-champ : rapprochées, elles indiquent un champ intense...



DESSINS D. GALLAND

**Flux d'un champ de vecteurs**
Ce dessin représente un écoulement de fluide en trois dimensions. La surface blanche entoure un volume de forme quelconque. En tout point de cette surface, le vecteur-vitesse (en jaune) peut être décomposé en deux vecteurs : l'un, normal à la surface (en noir), l'autre selon le plan tangent à la surface en ce point. Par analogie avec l'écoulement d'un fluide, Maxwell fait grand usage d'une notion, celle de "flux d'un champ de vecteurs" à travers une surface. Dans le cas de ce dessin, le "flux de vitesses" est défini comme le produit de la valeur moyenne de la composante normale du vecteur (les vecteurs noirs) par l'aire de la surface.




**Mathématiser une fuite...**
De l'eau s'écoule régulièrement dans un tuyau droit et étanche (A). Installons, par la pensée, deux sections quelconques (en gris) dans ce tuyau. Appliquons la définition du flux de vitesses (voir ci-contre) à la surface fermée particulière constituée par ces deux sections et la surface interne du tuyau. Si le tuyau ne fuit pas (B), le flux est nul, quelles que soient les positions des sections grises. En revanche, si un trou est percé (C), on trouvera des cas pour lesquels le flux de vitesses à travers la surface fermée ne sera pas nul. Où l'on perçoit comment rendre compte d'un fait physique (l'absence d'une fuite) par une notion mathématique (le flux de vitesses à travers n'importe quelle surface fermée est nul)...

**logie commode** mettant précisément en jeu des fluides. Reprenons l'écoulement d'un fluide et son champ de vitesse : existe-t-il une propriété qui permette de caractériser cet écoulement, en évitant de dessiner les vecteurs- vitesses, en tout point et à tout instant ? Cette propriété, Maxwell l'a cherchée dans la **notion de flux**. Un flux caractérise "ce qui s'écoule" perpendiculairement à travers une surface par unité de temps. Le cas extrêmement simple d'un tuyau droit, étanche, dans lequel s'écoule de l'eau, nous servira à comprendre l'utilité de la "mathématisation" de cette notion. Considérons une section de notre tuyau : la seule donnée de la vitesse à travers cette surface suffit pour déduire l'ensemble du champ de vitesses dans tout le tuyau. Evidemment...

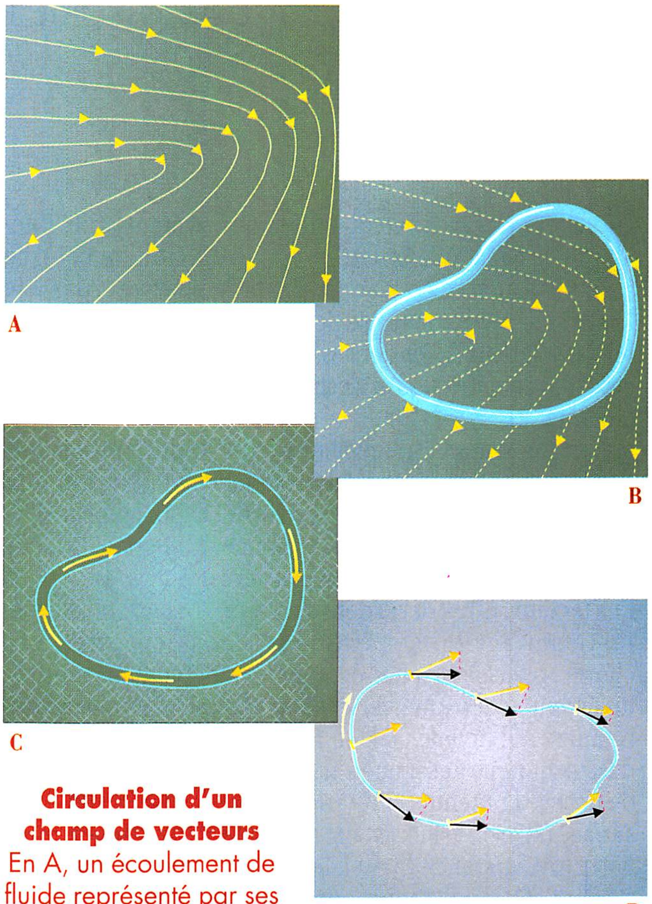
Supposons maintenant que le tuyau fuit, à un endroit ou un autre. Localement, le champ de vitesse se comportera de manière différente. Cherchons une grandeur mathématique qui permette d'affirmer que le tuyau fuit ou ne fuit pas. Pour cela, imaginons deux sections situées à deux endroits **quelconques** du tuyau. Ce faisant, nous avons construit une "surface fermée" : cette surface (qui enferme un volume) est formée des deux sections et de la surface interne de notre tuyau. Un flux de vitesse y "entre" en traversant la première section, un second flux en "ressort" en traversant la seconde. Si le plombier a fait correctement son travail, le flux à travers la surface interne du tuyau est nul. Nous définirons **le flux à travers la surface fermée** comme le bilan des flux à travers les diverses surfaces qui la composent (les flux entrant seront considérés comme positifs, les flux sortant négatifs). Dans ce cas, ce flux-bilan est nul (dessin B). Imaginons maintenant qu'un trou soit percé dans le tuyau, et que ce trou soit situé entre les deux sections : alors, le bilan des "flux de vitesses" à travers les diverses surfaces n'est plus nul (dessin C). Cet exemple est évidemment simpliste, mais il montre comment l'on parvient à "mathématiser" un fait physique : la présence d'une fuite. Il suffit en effet d'examiner le champ de vitesse dans notre tuyau et d'envisager n'importe quelle surface fermée : alors, si le flux de vitesse à travers chacune d'elles

est nul, on peut être certain que le tuyau est étanche... Nous tenons donc là une notion pertinente pour faire émerger une caractéristique globale d'**un champ de vitesse, donc d'un champ vectoriel**. Or, les champs électrique et magnétique sont eux aussi des champs vectoriels : c'est d'ailleurs leur seul point commun avec l'exemple des fluides, car il n'y a ni écoulement de matière, ni vitesse. Mais l'analogie fonctionne, et l'on s'autorisera à parler d'un "flux du champ électrique" : on pourra alors, d'une certaine manière, regarder s'il y a des "fuites", un "écoulement" vers l'extérieur d'une surface fermée imaginaire placée dans un tel champ...

La notion de flux associe champ vectoriel et surface fermée. Mais, depuis Faraday, on sait qu'autour d'un aimant les lignes de champ, qui en chaque point sont tangentes au vecteur-champ (3), décrivent des **boucles fermées**. Peut-on mettre au point un second outil mathématique qui associerait un champ vectoriel avec de telles boucles ?

Repartons d'un champ de vitesse décrivant l'écoulement d'un liquide, mais abandonnons le tuyau droit, et observons un volume plus large. Peut-on y faire apparaître un **mouvement global de rotation le long d'une boucle ?** Supposons qu'à un instant donné, on solidifie le liquide partout, sauf dans un tube de section constante, en boucle fermée (voir dessin). A l'extérieur, le liquide est figé, mais à l'intérieur du tube il est libre de continuer à se déplacer grâce à son impulsion. Si, avant la "solidification", le champ de vitesse était organisé de manière adéquate, on constatera effectivement que le liquide circule dans la boucle. A ce stade, on peut qualifier cette constatation et introduire une certaine grandeur, qu'on appellera la **circulation** (4). Elle est définie comme **le produit de la vitesse du liquide dans le tube par la circonférence de ce tube (sa longueur totale)**. Du point de vue de cette nouvelle grandeur, une petite boucle parcourue à une grande vitesse et une grande boucle parcourue à petite vitesse pourront être comparées. Rapporté au champ magnétique, l'intérêt de la notion de circulation s'impose : au voisinage immédiat d'un aimant, le champ s'organise en petites boucles fermées où le champ magnétique est intense, tandis qu'à mesure qu'on s'éloigne de l'aimant, les boucles s'allongent et l'intensité du champ faiblit.

Pour étranges qu'elles paraissent, ces deux notions – **le flux et la circulation d'un champ de vecteurs** – suffisent à décrire d'un seul coup toutes les lois de l'électricité et du magnétisme. Dans la formulation des équations de Maxwell ci-dessus, elles sont en fait dissimulées derrière les différentes utilisations du symbole ∇ (ce symbole se lit "nabla", et fut précisément introduit par Maxwell lui-même dans son *Traité*). ∇ constitue un outil mathématique singulièrement pratique ; il serait toutefois trop long d'en détailler ici les avantages. Contentons-nous donc d'exprimer les équations de Maxwell à l'aide de nos seules notions de flux et de circulation.




**Circulation d'un champ de vecteurs**
En A, un écoulement de fluide représenté par ses lignes de champ. En B, on installe un tube fermé transparent, de forme arbitraire, dans ce "champ de vitesses" qu'il faut imaginer en trois dimensions. En C, on fait l'expérience de pensée suivante : on "solidifie" l'ensemble du fluide sauf à l'intérieur du tube. Si le champ de vitesses était organisé convenablement, le fluide circule. En D, se trouve illustrée la définition mathématique d'une notion, abondamment utilisée par Maxwell, liée à cette idée de circulation. La circulation d'un champ de vecteurs est ainsi égale au produit de la composante tangentielle moyenne du vecteur (en noir) par la circonférence de la boucle (la donnée d'un sens privilégié de circulation permet de définir des contributions positives et négatives).

**La première équation** ($\nabla . \mathbf{E} = \rho/\varepsilon_0$) met en jeu le seul champ électrique, et s'intéresse au comportement de son flux à travers une surface fermée. Elle peut se lire ainsi :

$$\text{Le flux de } \mathbf{E} \text{ à travers toute surface fermée} = \frac{\text{la charge électrique totale intérieure}}{\varepsilon_0}$$

où $\varepsilon_0$ représente une constante conve-

3 – Où l'on voit que la représentation vectorielle vient "mathématiser" la représentation géométrique de Faraday.
4 – L'étymologie du verbe circuler justifie bien le choix de ce terme pour définir une grandeur correspondant à un mouvement en circuit fermé.

nable, caractéristique du milieu qui “abrite” le champ électrique.

Cette relation va nous servir à approfondir l'intérêt de l'analogie des fluides, retrouvant pour l'occasion les lignes de champ, géométriques et descriptives, de Faraday.

Prenons le cas extrêmement simple d'une seule charge électrique, que nous prendrons positive. **Les lignes du champ qu'elle engendre sont comme les épines d'un oursin : dirigées vers l'extérieur, elles divergent** (5). Pour toute surface fermée entourant la charge, on assiste à un “écoulement” du champ électrique vers l'extérieur (comme s'il fuyait...). L'équation ci-dessus indique aussi que s'il n'y a pas de charge contenue à l'intérieur de la surface (si $\rho=0$), le flux est nul ; en toute autre circonstance ($\rho\neq0$), le flux est non nul et proportionnel aux charges qui sont contenues à l'intérieur de cette surface.

Cette équation ne concernait que le seul champ électrique. Mais on sait que celui-ci entretient, avec le champ magnétique, d'intimes relations sur la nature desquelles la **deuxième équation de Maxwell** ($\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B}/\partial t$), lève une partie du voile. L'essentiel de l'électromagnétisme réside dans cette prise de conscience : **E** et **B** sont liés dès qu'intervient **le temps** (le symbole $\partial/\partial t$ exprime une petite variation, en fonction du temps, de la grandeur à laquelle il s'applique). Cette équation met en scène la **circulation** d'un champ le long d'une courbe C, tandis que cette courbe sert d'appui à une surface quelconque S (voir dessin). Sous cette expression,

la circulation de **E** le long d'une courbe C = 

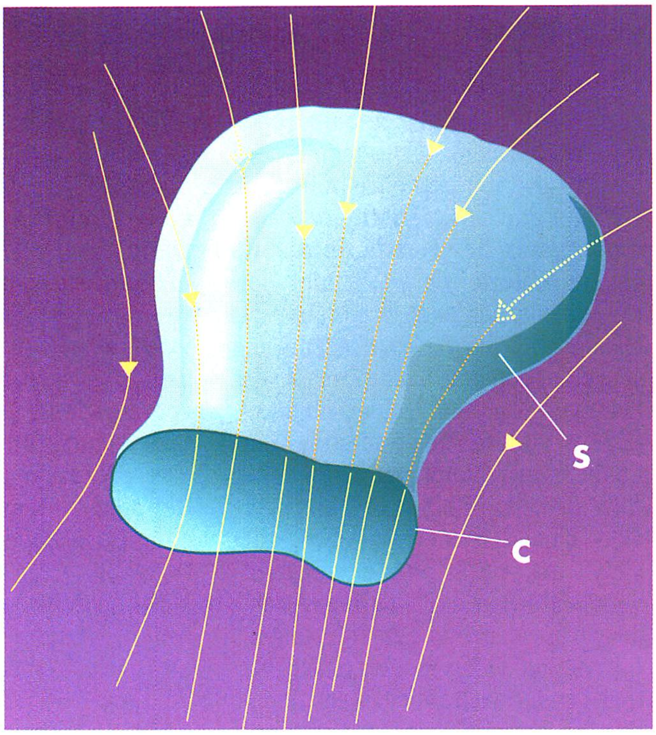
$$\frac{\partial}{\partial t}\ \text{(flux de } \mathbf{B} \text{ à travers S)}$$

l'équation montre qu'il faut une variation du champ magnétique (le terme $\partial \mathbf{B}/\partial t$) pour, par exemple, produire un champ électrique dans une boucle conductrice : les charges électriques du conducteur se mettront en mouvement sous l'action de la force créée par le champ, un **courant** circulera... Où l'on reconnaît sans grande difficulté la formalisation du phénomène d'induction, la loi de Faraday. *A contrario*, l'expérience a effectivement montré qu'un champ magnétique statique (lorsque $\partial \mathbf{B}/\partial t = 0$) était inefficace pour faire circuler un courant.

La **troisième loi** ($\nabla . \mathbf{B} = 0$) est la plus simple. Symétriquement à la première équation, elle ne s'intéresse qu'à un seul champ, ici le champ magnétique, et sa lecture peut s'effectuer ainsi :

le flux de **B** à travers toute surface fermée = 0

Le zéro à droite du signe “=” traduit précisément le fait qu'à partir d'un aimant, les lignes du champ magnétique **ne divergent pas** : celles qui “partent” de l'aimant tournent, tournent et finissent, tôt ou tard, par y revenir. Ainsi, **tout ce qui “sort” finit par retraverser la surface fermée** : au bilan le flux de **B** doit bien être toujours nul (6). Cette constatation traduit aussi qu'il n'existe pas d'équivalent magnétique à la charge électrique : la nature n'offre pas de “masses magnétiques séparées”, elles n'existent que par paires. De fait, si l'on coupe un aimant en deux et qu'on répète l'opération jusqu'au niveau le plus élémentaire, on ne parvient jamais à séparer un pôle magnétique nord d'un pôle magnétique sud. *A contrario,* si l'on y parvenait, le champ




DESSIN D. GALLAND

**Flux et circulation**

Comment articuler les notions de flux et de circulation : dans un écoulement en trois dimensions, représenté ici par quelques lignes de champ, installons par la pensée une courbe fermée C, de forme arbitraire. De même, considérons une surface S, de forme tout aussi quelconque, dont la seule contrainte est de “s'appuyer” sur la courbe C (la surface S est donc non fermée). Dans ses deuxième et quatrième équations, liant champ électrique et champ magnétique, Maxwell utilise avec profit cette notion de surface s'appuyant sur une courbe fermée : il articule la circulation d'un champ de vecteur (**E**) le long de C avec le flux, plus exactement avec la variation du flux d'un autre champ de vecteur (**B**) à travers S.

5 – D'où une autre formulation possible de cette équation à travers l'expression mathématique du fait que cette propriété du flux de **E** doit s'exercer, non pas à travers **une** certaine surface fermée, mais à travers **n'importe quelle** surface fermée. Cela se traduit par l'irruption d'un “être” mathématique qu'on nomme “la divergence” et qu'on écrit, en abrégé, div **E** (en son temps, Maxwell l'appelait la convergence!). Un degré d'abstration supplémentaire est franchi quand on remplace cette écriture, qui conserve un caractère descriptif, par l'utilisation de l'opérateur $\nabla$, mathématiquement plus “élégant” et par ailleurs internationalement compréhensible : div $\mathbf{E} = \nabla . \mathbf{E} = \rho/\varepsilon 0$

6 – Comme pour l'équation (1), on peut aussi écrire : div **B** (ou $\nabla . \mathbf{B}$) = 0

magnétique engendré par une "masse magnétique" individuelle devrait, comme le champ électrique, avoir une divergence. Or, il n'en a pas...

D'où provient donc le magnétisme ? C'est ce qu'exprime la dernière équation de Maxwell. Cette **quatrième loi** ($c^2\ \nabla \times \mathbf{B} = \partial \mathbf{E}/\partial t + \mathbf{j}/\varepsilon_0$) est la plus complexe. Elle fut d'ailleurs la plus difficile à faire émerger. Cette équation exprime que, pour toute surface S s'appuyant sur une courbe C,

$$c^2 \text{ (circulation de } \mathbf{B} \text{ le long de C)} = \frac{\partial}{\partial t} \text{ (flux de } \mathbf{E} \text{ à travers S)} + \frac{\text{flux du vecteur densité de courant à travers S}}{\varepsilon_0}$$

L'asymétrie avec la deuxième équation, qui faisait dépendre la création d'un champ électrique (**E**) de la variation d'un champ magnétique (**B**), est flagrante : aux constantes près, un terme supplémentaire règle en effet les relations entre circulation de **B** et flux de **E**.

Pour "faire parler" cette équation, commençons par considérer le cas le plus simple, celui où le champ électrique ne varie pas avec le temps : dans cette configuration, le premier terme à droite de l'équation ($\partial \mathbf{E}/\partial t$) est nul. L'équation pose la proportionnalité entre la circulation du champ magnétique **B** et le flux d'une nouvelle grandeur : **le vecteur densité de courant** (la densité de courant représente la charge qui s'écoule à travers une surface unité en une seconde ; son orientation a une importance, il faut bien prendre en compte un vecteur). On retrouve l'explication de l'expérience d'Oersted : un courant constant engendre un champ magnétique, dont les lignes de champ forment des boucles autour du fil conducteur [(7)].

Mais un champ magnétique peut aussi être créé par un effet dynamique, la variation du champ électrique, quelle qu'en soit la cause : ce que vient exprimer le premier terme ($\partial \mathbf{E}/\partial t$, analogue au $\partial \mathbf{B}/\partial t$ de l'équation 2) mis au jour par Maxwell (le phénomène d'Oersted, bien qu'il mette en jeu des courants, donc des déplacements de charges, ne relève pas strictement de la dynamique, puisqu'un courant constant crée un champ constant...).

Les deux termes à droite de la dernière équation de Maxwell soulignent l'origine de tout champ magnétique. Qu'il provienne d'un aimant, d'un circuit électrique ou de tout autre dispositif, le magnétisme est, en physique classique, un effet du mouvement de charges électriques [(8)] (en mécanique quantique, le spin introduit un phénomène différent). Reste la constante qui figure en tête de cette équation : le carré de la vitesse de la lumière. Maxwell l'a fait apparaître au cours de la construction de son système d'équations, elle était nécessaire pour en assurer la cohérence. Son analyse lui a révélé qu'elle avait les dimensions d'une vitesse au carré ($m^2/s^2$) et que la valeur, énorme, de cette vitesse était très proche de celle de la lumière dans le vide. De plus, son système d'équations révélait des solutions mathématiques du type "ondulatoire" : une variation de **E** entraîne l'apparition de **B** qui, variant dans le temps, engendre **E**, qui entraîne... etc. etc. Maxwell ne pouvait croire à une coïncidence. Le déroulement de ses calculs théoriques l'avait entraîné sur un terrain inattendu : la lumière ne serait-elle rien d'autre qu'une onde électromagnétique ?

Les quatre équations de Maxwell constituent le parangon des équations aux dérivées partielles [(9)]. Quatre lignes de signes tracés sur le papier suffisent à résumer l'électricité, le magnétisme et la lumière, condensant ainsi la théorie la plus précise de la physique classique. Quelle apothéose pour leur auteur : « *Imaginez son émotion lorsque les équations qu'il avait formulées lui révélèrent que les champs électromagnétiques se propagent sous forme d'ondes polarisées, et à la vitesse de la lumière ! Peu d'hommes au monde peuvent se vanter d'avoir eu une telle expérience.* » Ces lignes enthousiastes ne pouvaient être dues qu'à la plume d'un connaisseur en la matière : Albert Einstein...

Certes... Mais **établir** des équations est une chose, les **résoudre** en est une autre... En effet, dans un grand nombre de cas concrets, il n'existe pas de solution "analytique" à ce système d'équations : si sophistiquées soient-elles, les mathématiques ne permettent pas le plus souvent de calculer directement les champs **E** et **B** qui, en tout point et à tout instant, satisfassent à ces lois de Maxwell. Face à ces stars de la physique, belles et inaccessibles à la fois, les électromagnéticiens ont donc été amenés à faire travailler leur imaginaire : il en est sorti tout un arsenal de théories secondaires, adaptées à des problèmes particuliers (cf. l'article de C. Vassallo).

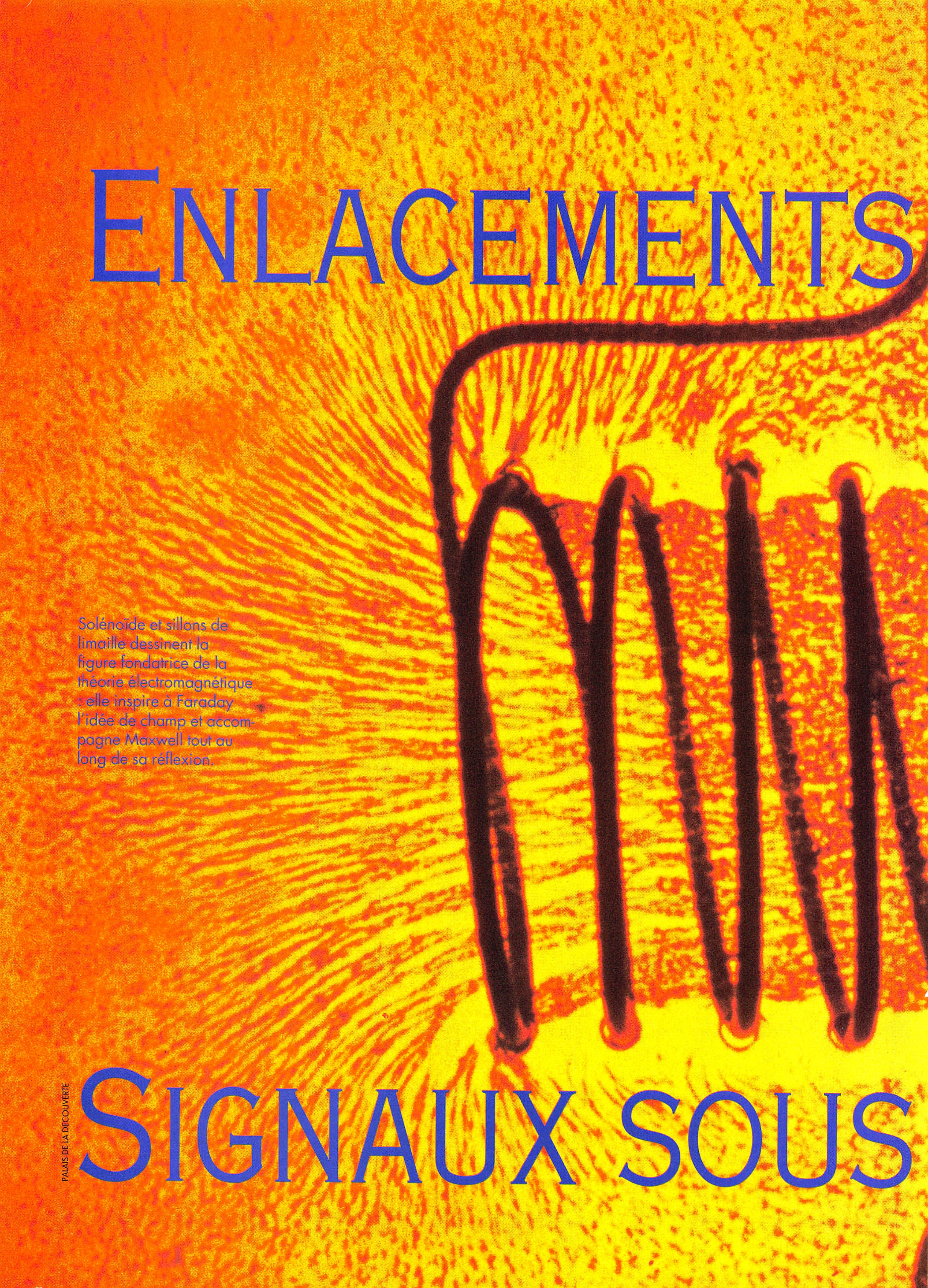
Mentionnons pour conclure que cette difficulté conceptuelle n'est pas l'apanage des équations de Maxwell : en tout cas, elle est étrangère à la réputation de complexité qui leur est attachée. Prenons par exemple les lois de Newton, beaucoup plus simples dans leur formulation. Elles sont à la mécanique ce que les équations de Maxwell sont à l'électromagnétisme : leur universalité fait leur gloire. Pourtant, elles se révèlent incapables de résoudre un problème concret, en apparence très simple : celui du mouvement de trois corps pesants... ■

**7** – Puisque ces lignes de champ sont sujettes à des rotations, Maxwell a créé une expression imagée pour exprimer la circulation de **B** le long de C : curl **B** (curl signifiant boucle en anglais). La traduction française a suivi la même idée : le rotationnel de **B**, en abrégé rot **B** (en notations simplifiées, cela s'écrit : $\nabla \times \mathbf{B}$).

**8** – Ce fait sera utilement mis à profit par Einstein pour élaborer sa théorie de la relativité restreinte (cf. *Cahiers* "Einstein", p. 68). Le magnétisme ne sera plus une propriété distincte de la matière, mais apparaîtra comme un effet relativiste de l'électricité.

**9** – Dans une équation différentielle ordinaire, la grandeur dépend de ce qui se passe en amont sur une trajectoire, **une ligne**. Dans une équation aux dérivées partielles, tout l'espace intervient : le comportement du champ électrique et du champ magnétique, en un point de l'espace et à un instant t, est relié aux valeurs que prennent ces grandeurs en des points **de l'espace** immédiatement voisins, à l'instant précédent.

# ENLACEMENTS

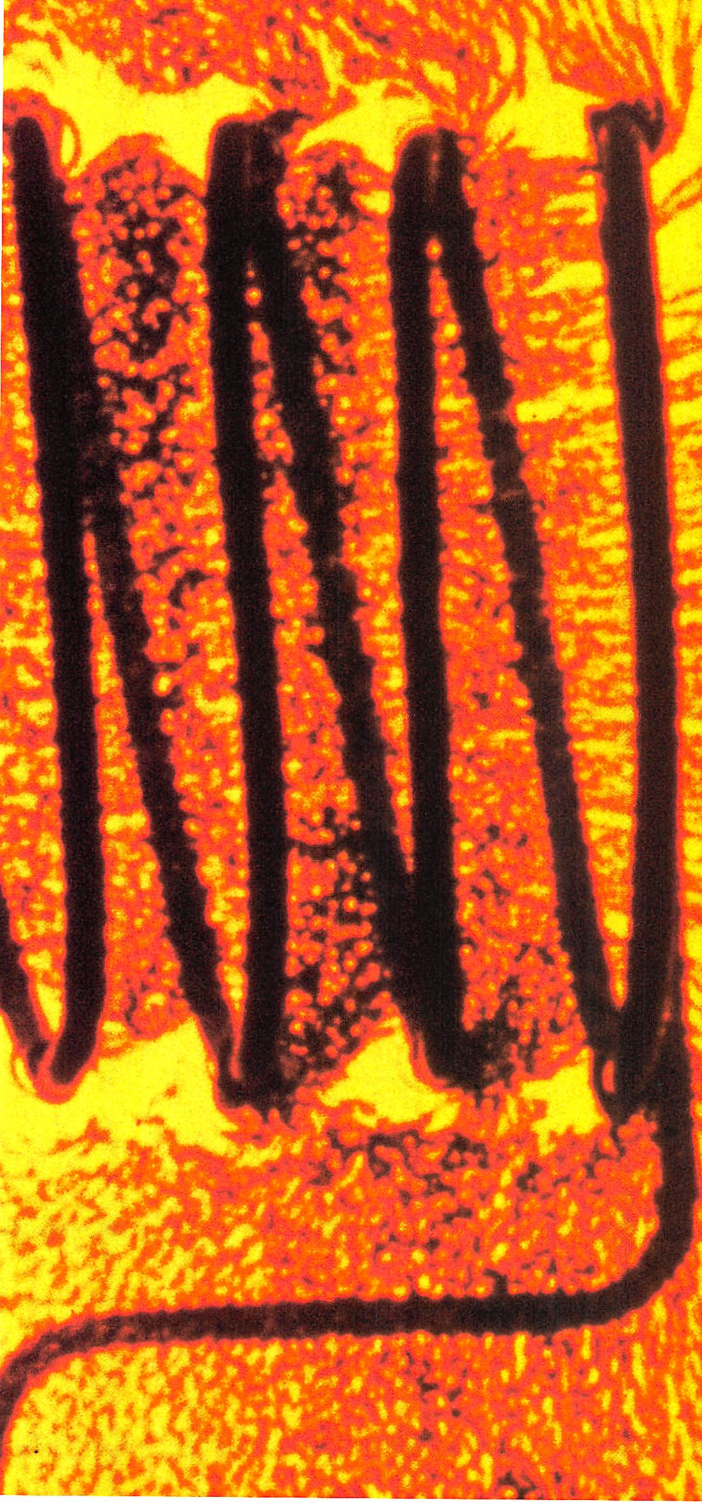


Solénoïde et sillons de limaille dessinent la figure fondatrice de la théorie électromagnétique : elle inspire à Faraday l'idée de champ et accompagne Maxwell tout au long de sa réflexion.

PALAIS DE LA DECOUVERTE

# SIGNAUX SOUS

# DANS L'ÉTHER,



L'HISTOIRE RETIENT SURTOUT QUE LA RÉUSSITE DE MAXWELL CONSISTE DANS LE DÉCHIFFREMENT D'UNE IMAGE : CELLE, TRACÉE PAR FARADAY, DES ANNEAUX ENLACÉS DE L'ÉLECTRICITÉ ET DU MAGNÉTISME. DE CETTE FIGURE IMMOBILE, MAXWELL FERA, EN TREIZE ANS, CELLE DE LA LUMIÈRE QUI SE PROPAGE ET DES COURANTS QUI CIRCULENT. MAIS IL NE FAUT PAS OUBLIER QUE MAXWELL TRADUISAIT EN TROIS LANGUES. LA PREMIÈRE ÉTAIT CELLE DES MATHÉMATIQUES. LA SECONDE, CELLE DE LA MÉCANIQUE, DANS LAQUELLE S'ÉCRIVAIT À L'ÉPOQUE LE TRIOMPHE DES CHAUDIÈRES À VAPEUR ET DES MACHINES-OUTILS. LA TROISIÈME, CELLE, NAISSANTE, DE LA TÉLÉGRAPHIE PAR CÂBLE, FLEURON DE L'EMPIRE BRITANNIQUE ET PRÉLUDE À L'ÈRE DE LA COMMUNICATION.

PAR MATTHEW NORTON WISE

# LA MER

En 1854, James Clerk Maxwell, sur le point d'obtenir son diplôme à l'université de Cambridge, écrit à son compatriote écossais William Thomson. Thomson fait alors autorité en Angleterre dans un domaine : les mathématiques appliquées à l'électricité et au magnétisme. Dans sa lettre, Maxwell lui demande conseil sur la meilleure façon d'aborder globalement la question, y compris l'ensemble des travaux de Faraday. Une longue correspondance s'engage entre les deux hommes...

Ce désir de Maxwell, réaliser la synthèse de l'électricité et du magnétisme, ne se relâche pas jusqu'à sa mort prématurée en 1879. Au long de ce quart de siècle, ses travaux se distinguent à la fois par une constance – symbolisée par une figure géométrique, celle de deux lignes enlacées – et une diversité de modèles et de moyens auxquels il recourt. Maxwell, dès le début, considère qu'il faut rechercher simultanément des niveaux d'explication différents. Il faut savoir, écrit-il, « *chausser les verres grossissants de la théorie, régler la focale tantôt sur un plan tantôt sur un autre, de manière à pénétrer différentes couches du grand socle du monde* ».

Appliquons ce point de vue pour lire sa propre histoire. Endossons le costume d'un archéologue pour aborder, par strates successives, la conception maxwellienne des lignes électrique et magnétique : nous commencerons par fouiller le niveau "géométrie", puis celui de la "mécanique" et finirons par le "social".

## L'ENLACEMENT DE L'ÉLECTRICITÉ ET DU MAGNÉTISME

Réduite à un jeu de quatre équations parfaitement symétriques, desquelles découle une équation sur la propagation des ondes lumineuses, la théorie des champs électromagnétiques de Maxwell est devenue une sorte de monument de vérité et de beauté pour la plupart des physiciens du XX^e siècle. L'unité et la simplicité des lois de la nature (plutôt que leur complexité et leur diversité) ont longtemps constitué leur Saint Graal. Une esthétique quasiment mystique s'est ainsi attachée aux équations de Maxwell. La meilleure trace se trouve peut-être dans une mode, un temps en vogue chez les étudiants de physique, d'arborer un tee-shirt portant l'inscription :

« Et Dieu dit :

$$\nabla . D = 0$$

$$\nabla . B = 0$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t}$$

et la lumière fut ! »

Apparemment, Dieu s'exprime dans le langage du calcul vectoriel et a conçu le monde en termes abstraits...

Ces formules ne sont pas tout à fait celles de Maxwell. Elles sont en réalité dues à l'un de ses disciples, Oliver Heaviside, un ingénieur-télégraphiste britannique autodidacte. Elles doivent également leur succès au physicien allemand Heinrich Hertz qui, le premier, confirma expérimentalement l'existence d'ondes électromagnétiques ayant les mêmes propriétés que la lumière. Quoi qu'il en soit, ces équations constituent le principal vestige de toute l'œuvre de Maxwell, et même de la culture scientifique de son époque.

Pour creuser l'histoire de leur genèse, nous nous appuierons sur deux éléments : les figures **symboliques**, extraites par Maxwell de la description par Faraday des "lignes de force" dans les "champs" électriques et magnétiques, et le traitement **mathématique** auquel Thomson les a soumises.

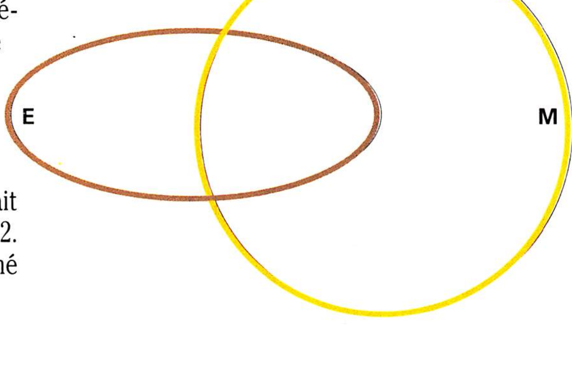
La figure géométrique qui s'impose d'emblée ressemble à un idéogramme : deux simples anneaux entrelacés (schéma ci-contre). Faraday l'avait dessinée dans un article publié en 1852. En se l'appropriant, Maxwell lui a donné un nom : l'"*enlacement mutuel*".

Les deux anneaux symbolisent une ligne magnétique M et une ligne de courant électrique E, symétriquement "enlacées". Ce schéma résume, en un sens, tous les résultats expérimentaux de l'époque. Mais pour Faraday, il révèle davantage : « *L'unicité de condition de deux énergies ou de deux formes d'énergie qui apparaissaient comme distinctes.* » Ce schéma implique que l'une ne peut être la cause de l'autre, et suggère que les champs électriques et magnétiques doivent être traités comme une **entité unique**. On ne peut décrire l'un sans décrire l'autre.

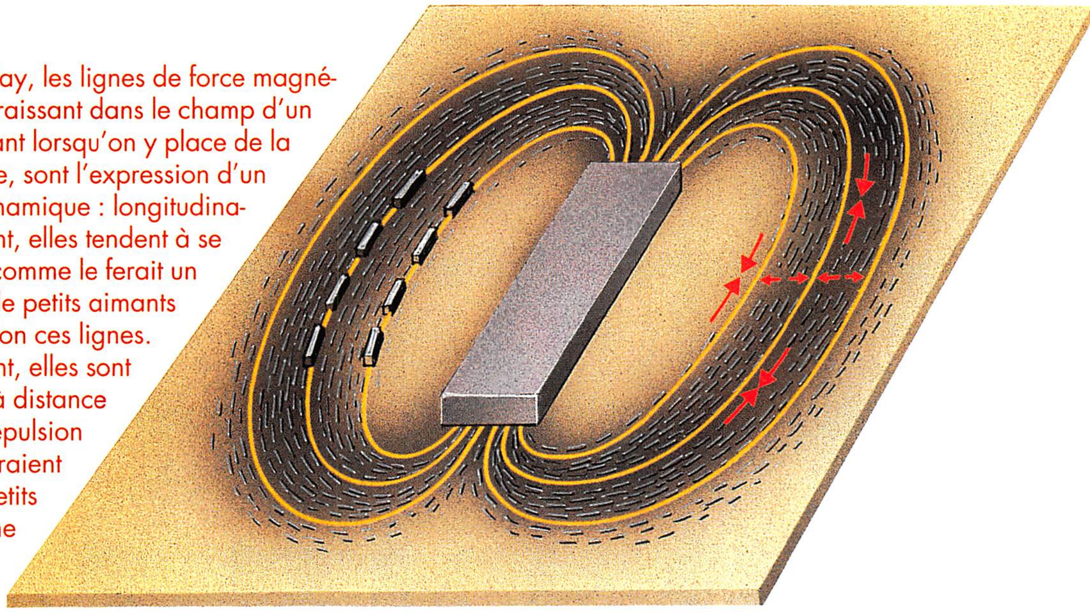
De fait, cette conception est solidement étayée par l'analyse menée par Faraday sur la dynamique des relations entre ces lignes. Il distingue deux notions : la tension le long d'une ligne – son "**intensité**" et la densité de lignes juxtaposées – leur "**quantité**". Ces deux notions font écho à celles qu'on met en œuvre pour traiter le problème de l'écoulement d'un fluide dans un tuyau : à l' "intensité" correspond le gradient de pression, à la "quantité" le flux de liquide.

Reprenons le dessin des lignes de force, matérialisées par la limaille autour

A la fois symbole et guide pour la pensée de Maxwell, la figure proposée par Faraday est directement inspirée de ses expériences sur l'induction : elle traduit l'unité de l'électricité et du magnétisme par des "lignes de forces" formant des anneaux enlacés. Maxwell entreprend de quantifier l'interaction de ces "anneaux".



d'un aimant : ces lignes sont **stables** (ci-contre). Faraday explique cette stabilité par l'équilibre de deux tendances concurrentes : la première pousse chaque ligne à se contracter sur elle-même, et la seconde la pousse à s'écarter de ses voisines.



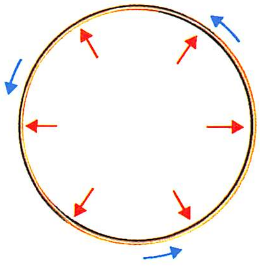
**S**elon Faraday, les lignes de force magnétiques, apparaissant dans le champ d'un aimant lorsqu'on y place de la limaille, sont l'expression d'un équilibre dynamique : longitudinalement, elles tendent à se contracter, comme le ferait un train de petits aimants disposés selon ces lignes. Latéralement, elles sont maintenues à distance par la répulsion qu'exerceraient ces mêmes petits aimants d'une ligne à l'autre.

DESSINS CLAUDE LACROIX

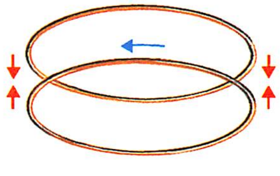
De la même façon, des lignes de courant électrique tendent à se "dilater" dans leur longueur (voir à droite : **a**) et à s'attirer latéralement (**b**), faisant naître, là encore, un équilibre. Mais que se passe-t-il dans un dispositif couplant magnétisme et électricité ? Remplaçons un aimant par une bobine conductrice (un solénoïde) : que montre le dessin du bas ? La contraction longitudinale d'une ligne magnétique s'effectue dans le même sens que l'attraction mutuelle des boucles de la bobine. Réciproquement, l'allongement de ces dernières s'effectue dans le même sens que la répulsion des lignes magnétiques voisines.

C'est cette structure **symétrique** de relations que Maxwell s'attache à quantifier dans les "lois" énoncées dans son article de 1856 : *On Faraday's Lines of Force*. L'appareillage mathématique lui est fourni par Thomson.

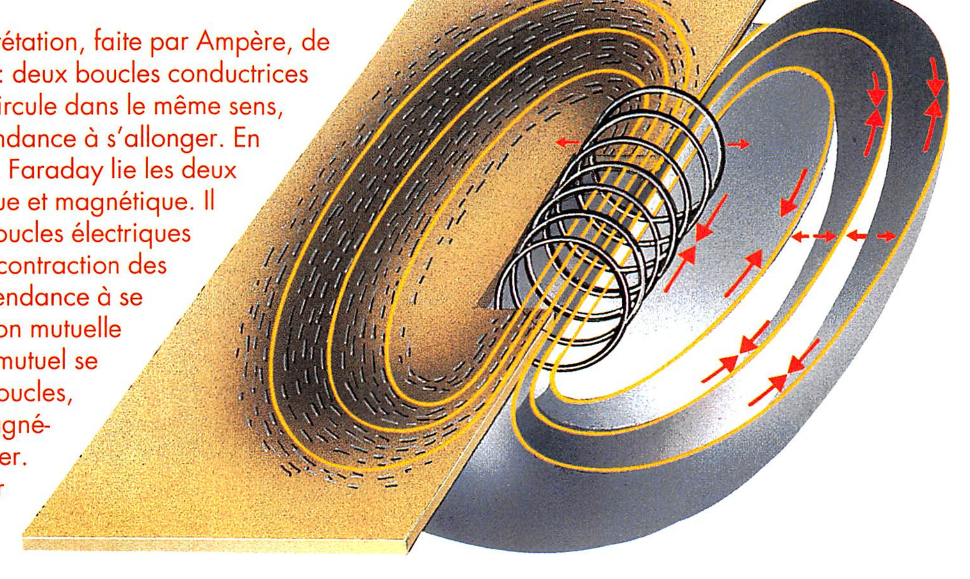
Prenons appui sur le schéma ci-dessous pour suivre le cheminement des idées de Maxwell. Une première relation s'impose. Elle n'est en fait que la reformulation de la loi, mise en évidence par Ampère, sur les relations entre magnétisme et courant électrique. Maxwell l'exprime ainsi : l'intensité magnétique, sommée le long d'une boucle fermée, est proportionnelle à la quantité totale de courant qui traverse la surface fermée par cette boucle. En termes qualitatifs, augmenter la quantité de boucles de courant dans le solénoïde accroît l'intensité magnétique dans une boucle fermée du champ magnétique. Le désir



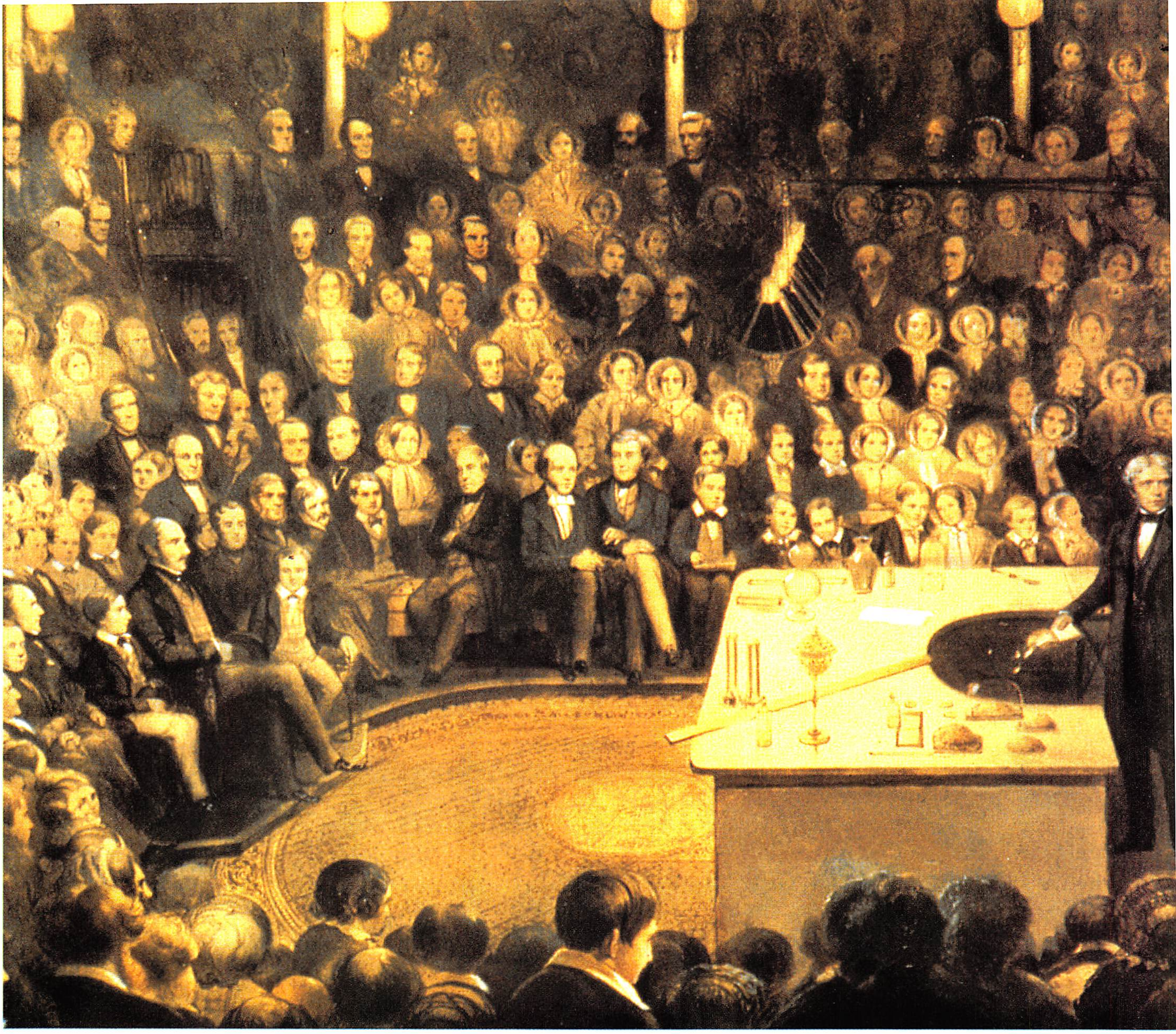
**a**



**b**



**L**e schéma intermédiaire visualise l'interprétation, faite par Ampère, de l'action dynamique d'un courant : deux boucles conductrices parallèles, dans lesquelles un courant circule dans le même sens, s'attirent ; une boucle unique, elle, a tendance à s'allonger. En remplaçant l'aimant par un solénoïde, Faraday lie les deux effets affectant les lignes électrique et magnétique. Il remarque que l'attraction mutuelle des boucles électriques s'effectue dans la même direction que la contraction des lignes magnétiques. De même, leur tendance à se dilater est parallèle à l'action de répulsion mutuelle des lignes magnétiques. Cet enlacement mutuel se quantifie en introduisant le nombre de boucles, déterminant la quantité (électrique ou magnétique), et l'intensité leur tendance à se dilater. Maxwell rencontre des difficultés pour assurer la symétrie de ses équations…


BRITISH ASSOCIATION

de symétrie qui anime alors Maxwell l'entraîne à poser une seconde relation : la quantité magnétique totale qui traverse n'importe quelle surface doit être proportionnelle au courant le long de la frontière de cette surface. Ce qu'en termes qualitatifs, appliqués à un solénoïde, on pourrait traduire par : l'augmentation du courant engendre une augmentation du nombre de lignes magnétiques. Or, ceci est faux : un courant plus intense ne modifie pas la géométrie des lignes magnétiques.

Comment sortir de cette impasse ? En étudiant de nouveau sa première relation (la loi d'Ampère), Maxwell prend conscience d'une nécessité mathématique, inhérente à ses équations : l'existence de cette relation dépend seulement du fait que le courant circule dans une **boucle fermée**. L'expression mathématique de cette condition s'écrit : $\nabla . \mathbf{Q}_e = 0$ (ou encore, la divergence est nulle : voir l'article précédent pour l'explication de ces notions).

Or, une condition du même type existe évidemment pour les boucles fermées magnétiques : $\nabla . \mathbf{Q}_m = 0$. L'équivalence des expressions mathématiques autorise Maxwell à postuler l'existence d'une intensité –"à définir"– qui satisfasse, de manière symétrique à la loi d'Ampère, à une relation avec la quantité magnétique. Maxwell l'appelle l'intensité "électrotonique". Il emprunte cet adjectif à la terminologie de Faraday, qui suggérait que la matière, soumise à des phénomènes électromagnétiques, se trouvait dans un état *électrotonique*.

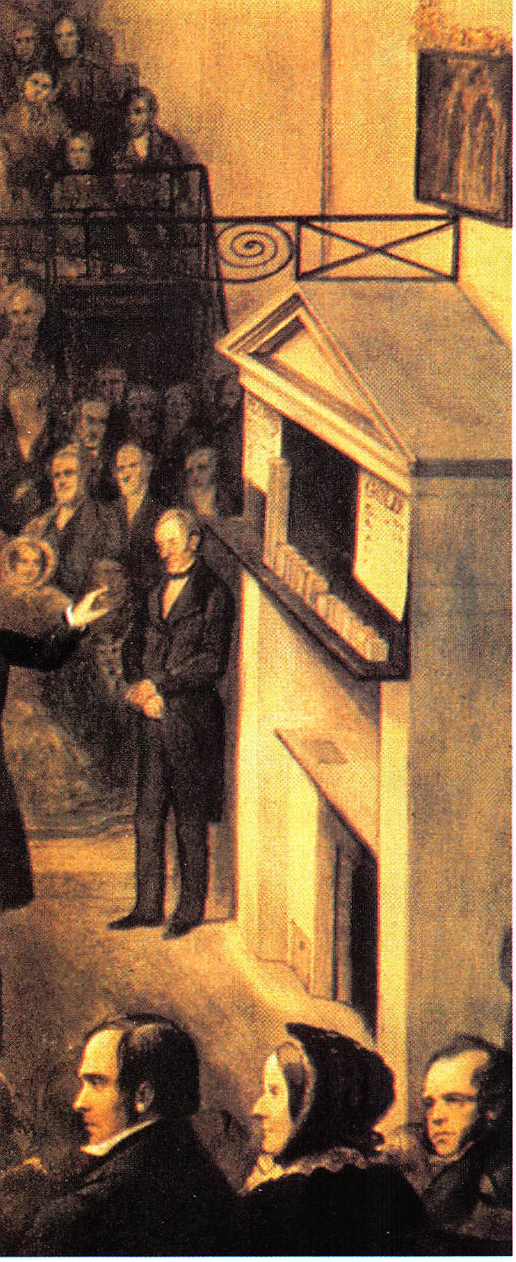
L'intensité électrotonique de Maxwell ne repose, selon ses propres explications, sur aucune base physique : « *C'est seulement une sorte de notation artificielle* ». Le mot électrotonique disparaîtra ensuite du vocabulaire de Maxwell, et cette étrange intensité recevra un nom qui nous est aujourd'hui plus familier : le potentiel vecteur... Toutefois, à ce stade de l'élaboration des équations, cette notion est bien pratique. Elle permet de sauvegarder une symétrie parfaite, comme on le lit ci-dessous :

Faraday diffuse le résultat de ses expériences devant les publics les plus variés. (Conférence de Noël, 1855)

« *L'intensité électro-tonique (Io) intégrée le long de la frontière d'un élément de surface mesure la quantité d'induction magnétique (Qm) qui traverse cette surface ou, en d'autres termes, le nombre de lignes de force magnétique qui la traversent.*

*L'intensité magnétique (Im) intégrée le long de la frontière d'une surface **quelconque** est une mesure de la quantité de courant électrique (Qe) qui traverse cette surface.* »

Ces relations rendent bien compte de



"l'enlacement mutuel". De plus, elles sont complètement générales : en particulier, elles ne requièrent pas que les frontières des éléments de surface soient elles-mêmes des lignes de force. Dans l'énoncé de Maxwell, le mot *quelconque* est important. N'importe quel couple de lignes fermées entrelacées, placées dans un espace de courants et de lignes magnétiques, sera soumise aux mêmes relations qu'une boucle conductrice matérielle et une ligne de force magnétique.

Evidemment, Maxwell donne à ces relations une forme différentielle (ci-dessous à gauche). Bien que les grandeurs mises en œuvre dans leur formulation moderne soient différentes, la symétrie est toujours aussi clairement affichée (ci-dessous, à droite) :

$\nabla \times I_0 = Q_m$ $\qquad \nabla \times A = B$

$\nabla \times I_m = Q_e$ $\qquad \nabla \times H = J$

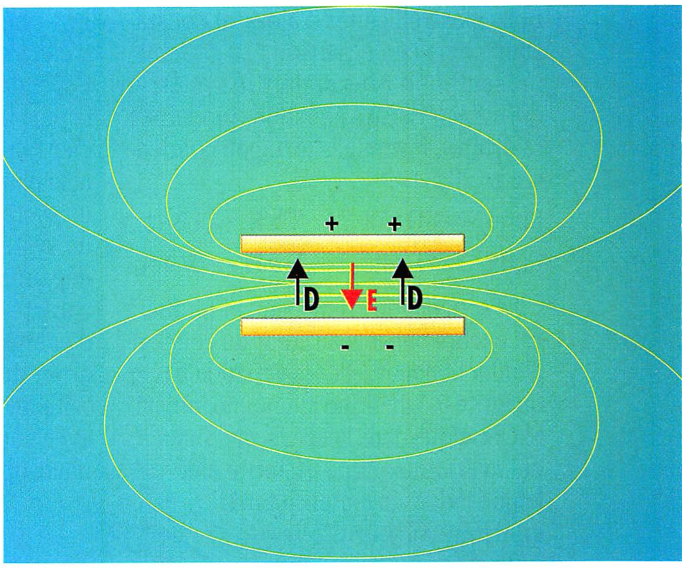
Toutefois, et de son propre aveu, cette première incursion dans le domaine de l'électromagnétisme n'est guère plus qu'une reformulation d'autres théories, notamment celle de Weber. Maxwell est également conscient qu'elles ne s'appliquent qu'à des circuits électriques fermés, dans lesquels circulent des courants continus : le temps est absent de ces équations. Comment donc interpréter les relations fondamentales entre l'électricité statique et les courants électriques dans des circuits "ouverts", par exemple lors de la charge d'un condensateur ? De surcroît, ces équations ne disent rien sur la nature des relations entre électricité, magnétisme et lumière dont, quatre ans plus tôt, Faraday avait démontré l'existence (voir article de Christine Blondel).

Enfin, la grande découverte de Faraday, l'induction – un champ magnétique variable crée une force électromotrice dans un conducteur – exige inévitablement une nouvelle loi. Maxwell introduit donc une équation supplémentaire, exprimée dans une forme proche des précédentes, sans toutefois respecter leur symétrie. Cette équation pose l'égalité de la force électromotrice induite (l'intensité électrique ordinaire) avec le taux de variation de l'intensité électrotonique. Exprimée en termes de lignes de force, elle signifie que la force électromotrice totale dans une boucle conductrice est donnée par le taux de changement de la quantité magnétique traversant la surface délimitée par ce circuit.

$$I_e = -\frac{\partial I_0}{\partial t} \quad \text{ou}$$

$$\nabla \times I_e = -\frac{\partial Q_m}{\partial t}$$

Vers 1861-1862, Maxwell trouve le moyen de résoudre les évidentes insuffisances de son premier traitement de l'"enlacement" en le reformulant pour des phénomènes variant avec le temps. Cependant, une nouvelle fois, il n'y parvient qu'en introduisant une nouvelle entité mathématique. Comme la précédente, elle est dépourvue de toute réalité physique, une audace inacceptable pour son ami Thomson. Maxwell suppose, en l'occurrence, qu'un "courant électrique" se produit dans l'espace, par exemple entre les deux plaques d'un condensateur en cours de charge, à chaque fois qu'apparaît une tension électrostatique. Maxwell nomme cet hypothétique courant "courant de déplacement". Cette "abominable" notion traduit l'idée que, soumis à une tension électrostatique, l'éther se déplace, ou




**P**our compléter la symétrie de son modèle, Maxwell tente une interprétation dynamique des charges électriques de l'électrostatique usuelle : il décrit l'effet de la charge croissante d'un condensateur comme une contrainte exercée par le courant sur le milieu séparant les deux plaques. Il nomme ce phénomène "courant de déplacement" (D sur la figure), et le relie à l'intensité du champ magnétique.

subit une "polarisation", et que ce processus est constitutif d'un courant. On remarquera, mais nous y reviendrons, que cette notion est apparue dans l'œuvre de Maxwell en même temps qu'un modèle mécanique tout aussi problématique, décrit dans son article de 1861-1862 : *On Physical Lines of Force* (De la physique des lignes de force).

Ayant donc introduit ce "courant de déplacement", Maxwell obtient une deuxième équation d'induction, analogue à celle de l'induction électromagnétique. Elle établit que l'intégrale de l'intensité magnétique le long d'une boucle fermée **dans l'espace vide** (donc sans fil conducteur) est égale au taux de variation du déplacement électrique (une quantité $\mathbf{Q}_e'$) traversant la surface délimitée par la boucle. Laissons pour l'instant les modèles mécaniques essentiels à la compréhension des conceptions maxwelliennes d'alors, et constatons ceci : ces équations (à gauche) présentent d'ores et déjà la symétrie qui caractérise les équations modernes (à droite), formulées de façon condensée en 1868.

$\mathrm{Curl}\ \mathbf{I}_e = -\,d\mathbf{Q}_m/dt \qquad \nabla \times \mathbf{E} = -\,\partial \mathbf{B}/\partial t$

$\mathrm{Curl}\ \mathbf{I}_m = d\mathbf{Q}_e'/dt \qquad \nabla \times \mathbf{H} = \partial \mathbf{D}/\partial t$

Le schéma de l'"enlacement mutuel" est encore une fois au cœur du concept d'induction mutuelle : la variation d'une quantité magnétique induit une intensité électrique dans l'espace environnant, et la variation d'une quantité électrique induit une intensité magnétique autour d'elle. Toutefois à la différence de l'"enlacement" appliqué à la statique de 1855, ce nouveau mode d'"enlacement" a la possibilité de **se propager**. Toute intensité électrique induite aura en effet la forme d'un courant de déplacement. Or celui-ci induira dans l'espace une nouvelle intensité magnétique et une quantité magnétique associée, laquelle devra à son tour induire un autre courant de déplacement, et ainsi de suite à l'infini... Le produit de ces inductions mutuelles se propage dans l'espace : telle est la grande invention de Maxwell.

Partant de ces équations, et d'un ensemble de relations associées à ses modèles mécaniques (voir plus bas), Maxwell parvient, dès 1862, à formuler une équation d'onde pour les perturbations électromagnétiques. Ces ondes doivent, lui semble-t-il, se déplacer à une vitesse proche de celle de la lumière. Il conclut hardiment : « *On peut difficilement ne pas en conclure que la lumière consiste en des vibrations transverses du même milieu qui est la cause des phénomènes électriques et magnétiques.* »

Au cours des dix années suivantes, Maxwell développe des versions, à la fois plus détaillées et plus générales de ce schéma, que résume son *Traité d'électricité et de magnétisme* de 1873. Cependant, de toutes ces formulations, la plus importante aux yeux des physiciens du XXe siècle est la plus élégante et la plus abstraite : c'est celle qui traite un système électromagnétique comme un système dynamique généralisé, **indépendant de tout modèle mécanique**, caractérisé seulement par sa fonction d'énergie (appelée son *Hamiltonien*, du nom du mathématicien irlandais, William Hamilton, à ne pas confondre avec son homonyme, le professeur de philosophie de Maxwell à Edimbourg).

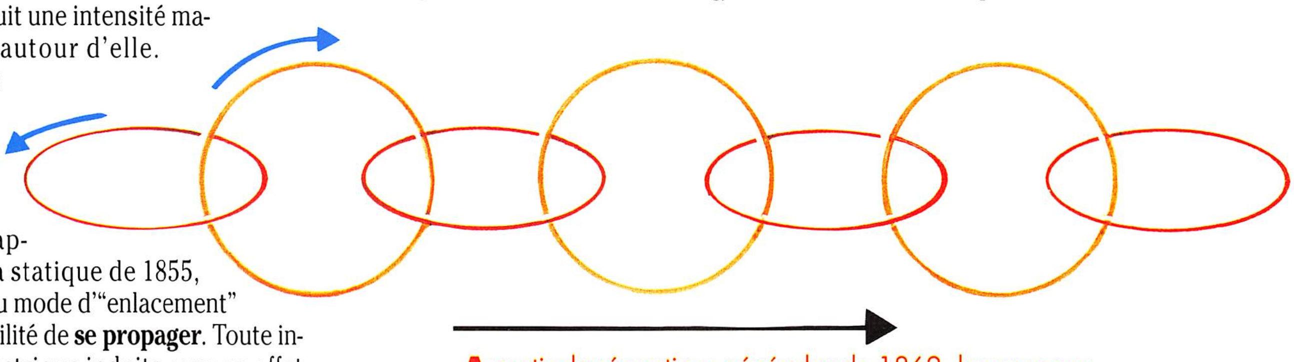
## LA PHYSIQUE DES LIGNES ET LE MOUVEMENT DES MACHINES

L'histoire, telle que nous venons de l'évoquer, est celle qui s'est dessinée en partant de la perspective du XXe siècle. Dans cette perspective, les progrès de la physique mathématique apparaissent comme un cheminement sur une sorte de voie royale, pavée de concepts abstraits, joignant en ligne droite Faraday, Maxwell et Einstein. Sur cette route, les règles de circulation donnent la priorité aux formes mathématiques sur les objets matériels. La beauté et l'unité des lois naturelles s'expriment à travers la pure simplicité géométrique.

Malgré sa beauté, cette histoire ne constitue qu'un contour, une projection en deux dimensions de l'histoire vivante : elle ne montre que l'ombre portée sur le passé par l'éclairage rétrospectif du XXe siècle.

Le monde de Maxwell n'était encore ni celui de la physique moderne, ni celui de l'esthétique moderniste. Même s'il en marque les débuts, même si ses œuvres ont fourni les outils grâce auxquels la modernité s'est formée, il faut se souvenir que Maxwell a vécu dans un univers fasciné par le machinisme. Sa géométrie est une cinématique, au sens de l'époque : une science des courbes et des surfaces engendrées par les pièces mobiles d'une machine.

Tel est le sens qu'Ampère avait donné au mot cinématique en 1834. En 1841,

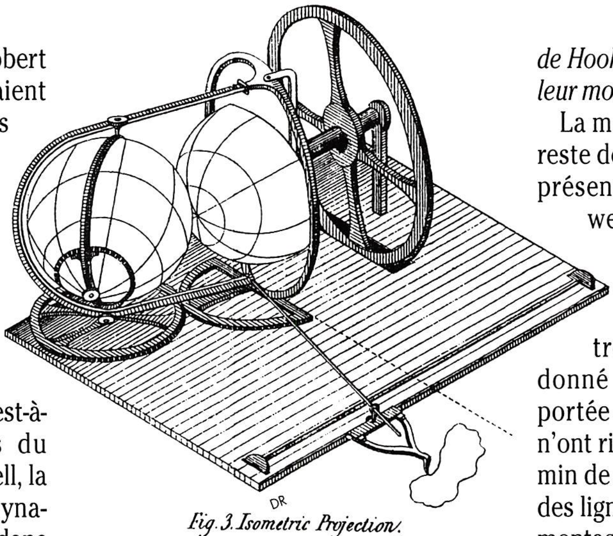


**A** partir des équations générales de 1862, les anneaux de Faraday prennent vie : l'induction mutuelle des quantités électriques et magnétiques variables rend compte de la propagation des "lignes" électromagnétiques dans l'espace.

deux professeurs de Cambridge, Robert Willis et William Whewell, s'en étaient servis pour qualifier les contenus respectifs de leurs Traités de mécanique pour l'ingénieur. Dans l'un, Willis traitait du mécanisme (ou cinématique), la science des liaisons mécaniques. Dans l'autre, Whewell abordait la mécanique, ou plus précisément la dynamique, la science des énergies motrices et des quantités de travail, c'est-à-dire des causes et des effets du mouvement. Après Willis et Whewell, la distinction entre cinématique et dynamique s'est rapidement répandue dans la communauté scientifique de Cambridge. Elle ne trouvera toutefois son expression achevée qu'en 1867, dans le *Traité de philosophie naturelle* de Thomson et Tait – les deux collègues écossais de Maxwell surnommés familièrement T et T'. La meilleure illustration de leur cinématique se trouve peut-être dans le "calculateur de marée" de Thomson : une sorte de calculatrice mécanique utilisant les séries de Fourier, et combinant quinze mouvements harmoniques simples pour produire un calendrier perpétuel de marées.

Maxwell porta un intérêt évident à cette cinématique. Impressionné par les instruments qu'il avait vus à la Grande Exposition de Londres de 1851, il a lui-même construit un "platomètre" destiné à mesurer les aires de figures planes. « *J'ai éprouvé de grandes satisfactions*, écrit-il, *à tirer les conséquences mécaniques du théorème mathématique sur lequel repose la vérité de cette méthode.* »

Ce désir s'est en fait très tôt révélé chez Maxwell : dès ses années d'école, il s'intéresse aux figures géométriques sous l'angle de "leur mécanique". Pour preuve, le premier article qu'il publie en 1846, à l'âge de 15 ans, alors qu'il est encore étudiant à l'Académie d'Edimbourg. Ce texte traite des "courbes ovales" engendrées par une pointe traceuse, fixée au bout d'une corde de longueur donnée passant autour de deux ou trois épingles. Plus tard, préparant




**Le "platomètre" conçu par Maxwell vers 1851 utilise la géométrie des mouvements sphériques pour calculer l'aire d'une surface quelconque.**

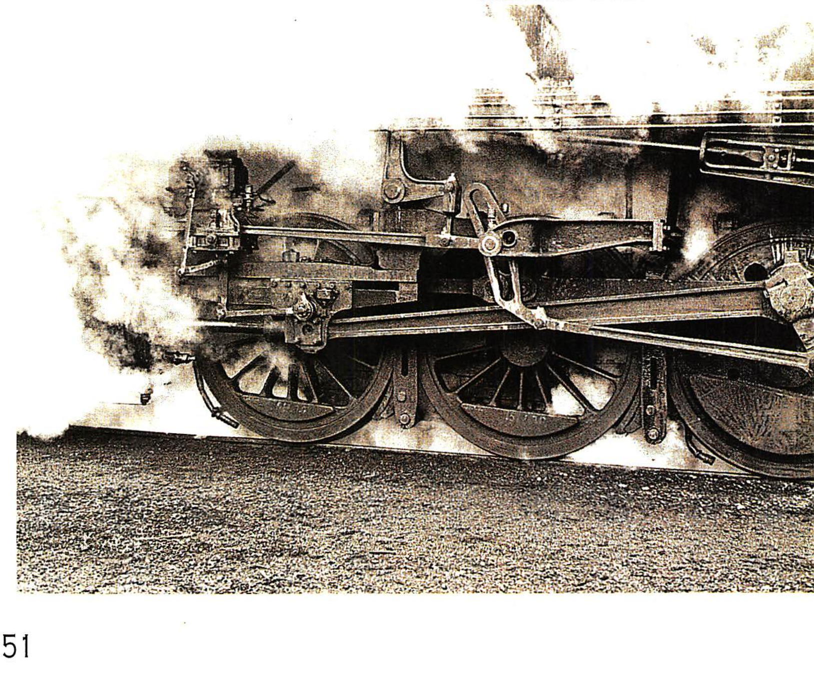
son article sur les *Lignes de force de Faraday*, il s'intéresse aux surfaces engendrées par des "lignes de flexion". Les lignes de Faraday elles-mêmes, dans la première interprétation de Maxwell, sont produites de façon identique aux lignes de flux d'un liquide parfait. Une fois professeur à Aberdeen, il fait de cette "*mathématique incarnée*", ainsi qu'il l'appelle, une partie importante de son cours. En 1859, il écrit à Thomson qu'il a introduit la cinématique dans son enseignement, « *sous la forme de roues dentées, de manivelles, de joints de Hook, etc., tous étudiés sous l'angle de leur mouvement* ».

La mécanique des machines réelles reste donc toujours très proche des représentations géométriques que Maxwell se fait des phénomènes physiques.

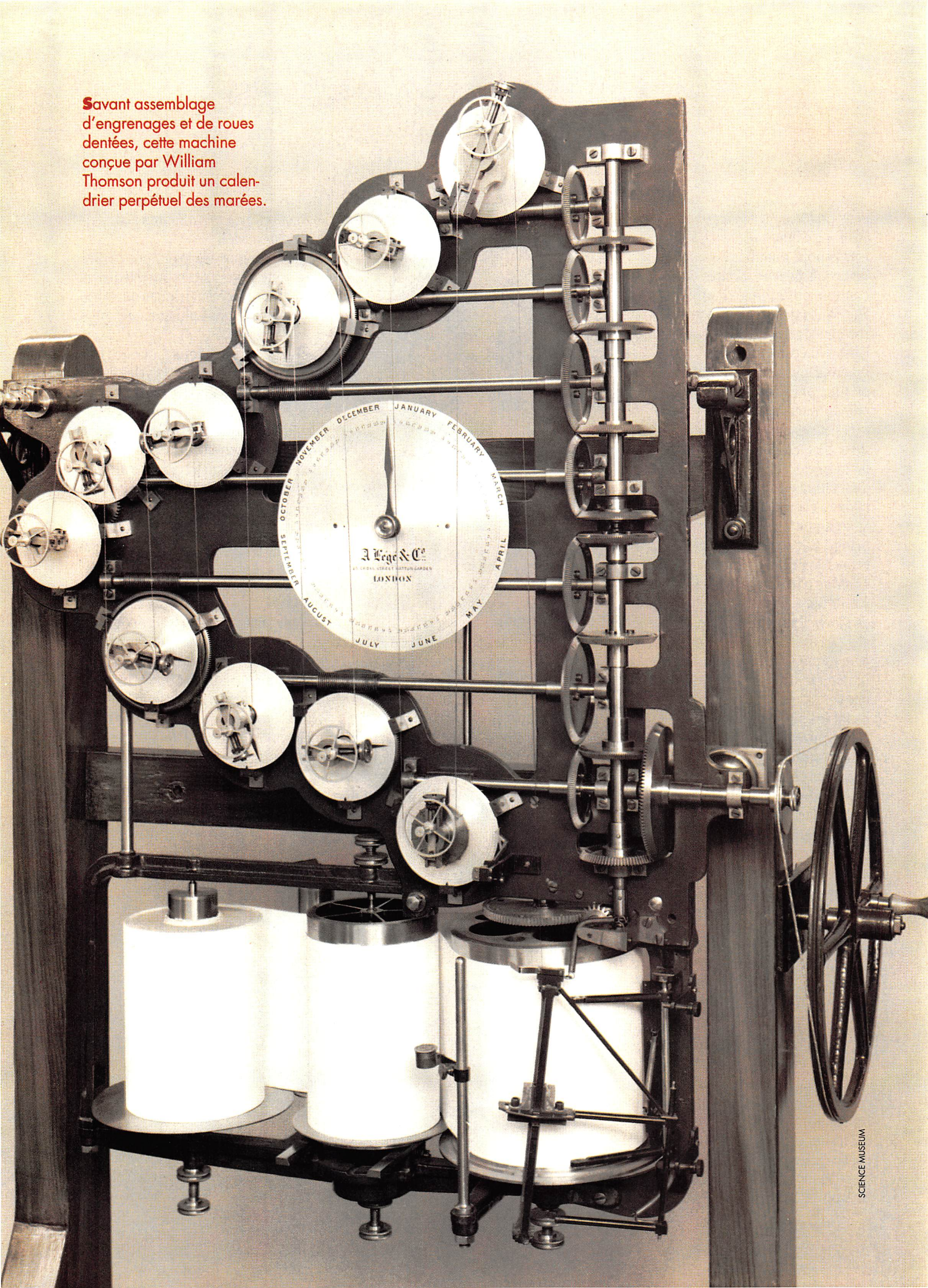
Elargissons encore le champ de vision. Quelles lignes trouve-t-on dans la culture qui a donné à l'œuvre de Maxwell toute sa portée ? Des lignes qui, elles non plus, n'ont rien d'abstrait : des lignes de chemin de fer, des lignes transatlantiques, des lignes télégraphiques, des lignes de montage.... C'est de ces lignes-là qu'il tire la plus grande part de son inspiration intellectuelle et... de ses ressources matérielles.

D'Edimbourg à Londres, de Londres à New Delhi, l'ensemble de ces lignes, ferroviaires, maritimes ou électriques, tissent son monde. Elles portent aux quatre coins de la Terre l'influence culturelle, économique et politique de l'Empire britannique. Lorsque Willis et Whewell traitent de "mécanisme" et de "mécanique", qu'étudient-ils ? Des machines plus ou moins compliquées mues par des chaudières à vapeur. Suivant Charles Babbage, et préfigurant Maxwell, ces deux auteurs abordent

CAREMENTRANT – LA VIE DU RAIL



**Pour étudier les phénomènes électromagnétiques, Maxwell puise ses représentations dans le mouvement de pièces mécaniques.**




Savant assemblage d'engrenages et de roues dentées, cette machine conçue par William Thomson produit un calendrier perpétuel des marées.

SCIENCE MUSEUM

l'étude des machines en les divisant en parties fonctionnelles : production d'énergie, mécanismes de transmission, et consommation d'énergie.

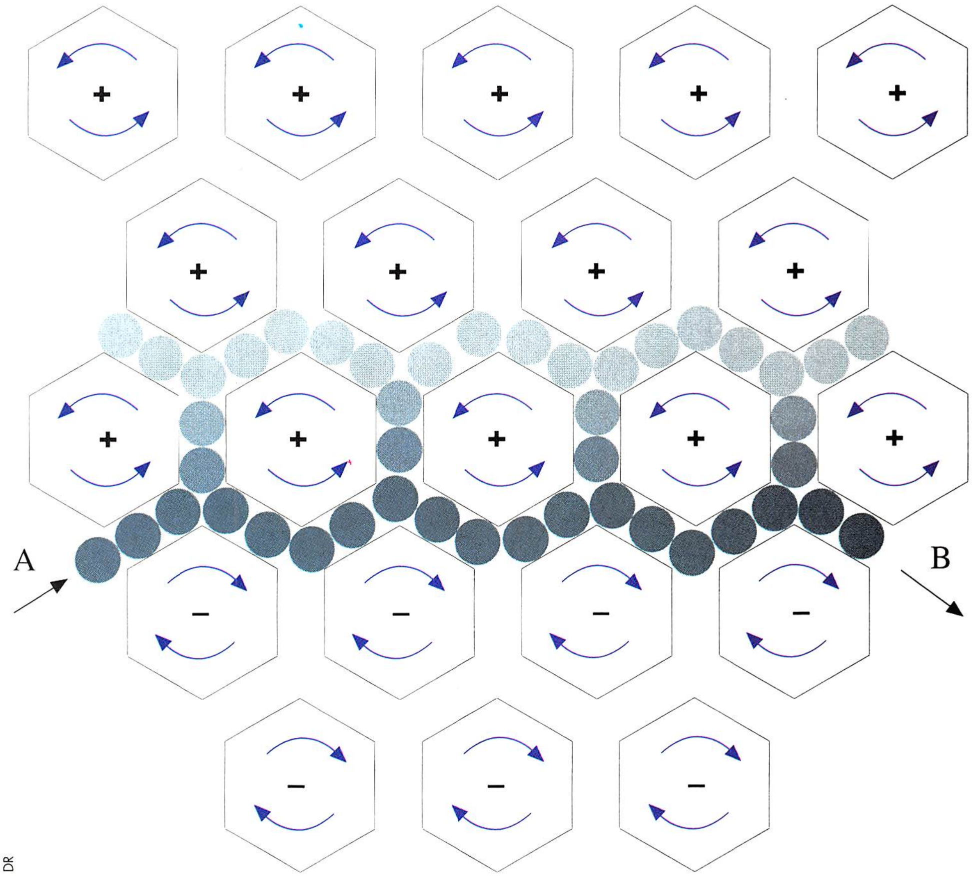
La géométrie génératrice de Maxwell s'applique à la partie "mécanismes de transmission". Dans un système de transmission, l'énergie passe d'un point à un autre par l'action de chaque pièce sur les pièces voisines. Ce que Faraday nommait "l'action contiguë". En fait, Maxwell emprunte à Thomson l'interprétation de la dynamique de l'action contiguë dans un champ de force.

Pour la définir, Thomson s'appuie sur une analogie : celle des flux de chaleur et des sources d'énergie dans les machines à vapeur. Il interprète la tendance naturelle de la chaleur à passer du chaud au froid comme une "optimisation" : une tendance à minimiser le contenu en travail au cours de la distribution de l'énergie. De la même façon, les lignes de force doivent se distribuer spontanément, de manière à transmettre l'énergie selon la voie la plus facile. Le champ tend donc à renfermer le minimum de travail. Cette tendance à l'extrémum fournit à Maxwell le principe dynamique fondamental de son essai sur *Les lignes de force de Faraday*. Ainsi, les machines à vapeur et ces principes d'économie (la meilleure disposition possible des éléments d'un système) ne constituent pas une sorte de vague contexte, mais la source réelle des mathématiques que Maxwell et Thomson appliquent à ces considérations sur l'énergie.

Tout cela, il est vrai, ne concerne encore que la cinématique des lignes : leur géométrie à l'**état stable**, comparable à celle des rouages d'un train de transmission soumis à des conditions constantes de charges et de forces appliquées. Le modèle n'aborde ni la **dynamique** du démarrage du moteur, ni la mécanique de transmission d'une pièce à l'autre, ni la consommation d'énergie lors de la montée en charge.

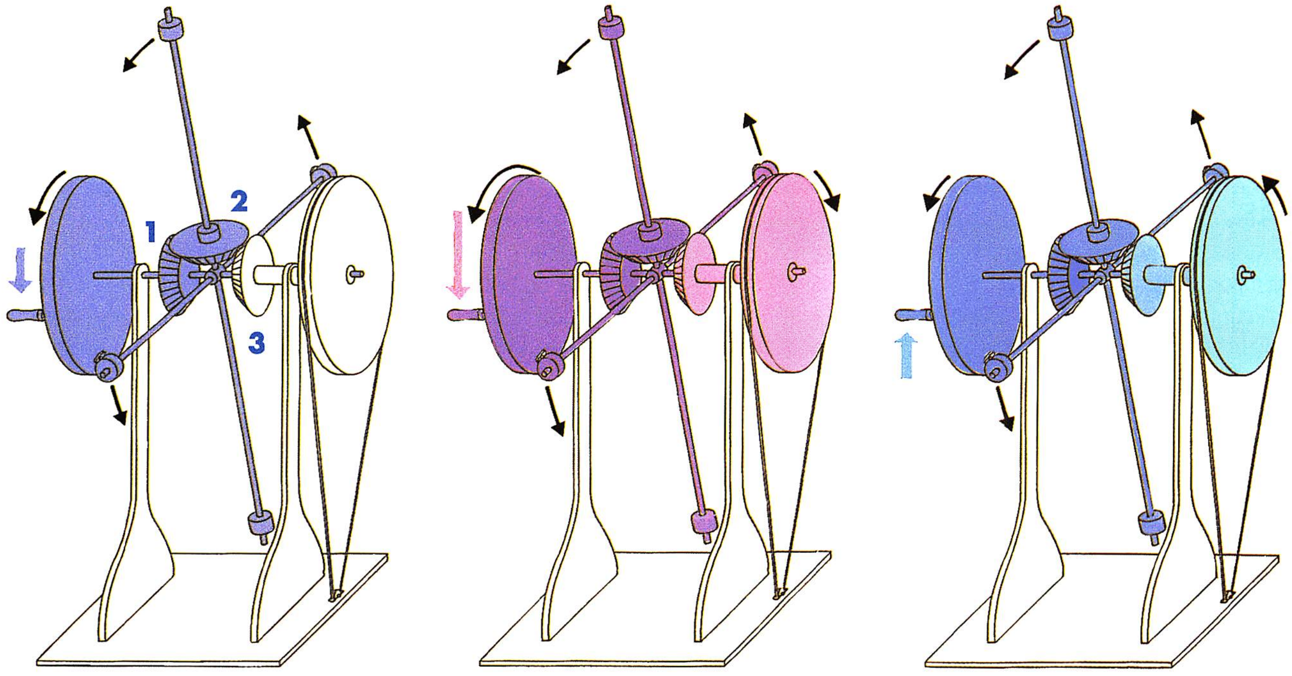
Ces problèmes, Maxwell tente de les résoudre à l'aide des modèles mécaniques et des équations qui figurent dans son article sur "*La physique des lignes de force*". Dans cet article, il tente, pourrait-on dire, d'accoupler un moteur au système d'engrenage, en prenant en compte le processus de propagation de l'action électromagnétique, dès que le courant circule dans un circuit conducteur jusqu'au moment où son action se propage dans l'espace, puis induit un second courant dans un autre conducteur. La figure en est restée célèbre.

Chacune des cellules hexagonales représente une coupe à travers une ligne de force magnétique. Maxwell se représente cette dernière comme un tourbillon filiforme (un fluide en rotation autour d'un axe) tournant selon la flèche. Thomson avait en effet montré que, pour expliquer l'expérience de Faraday

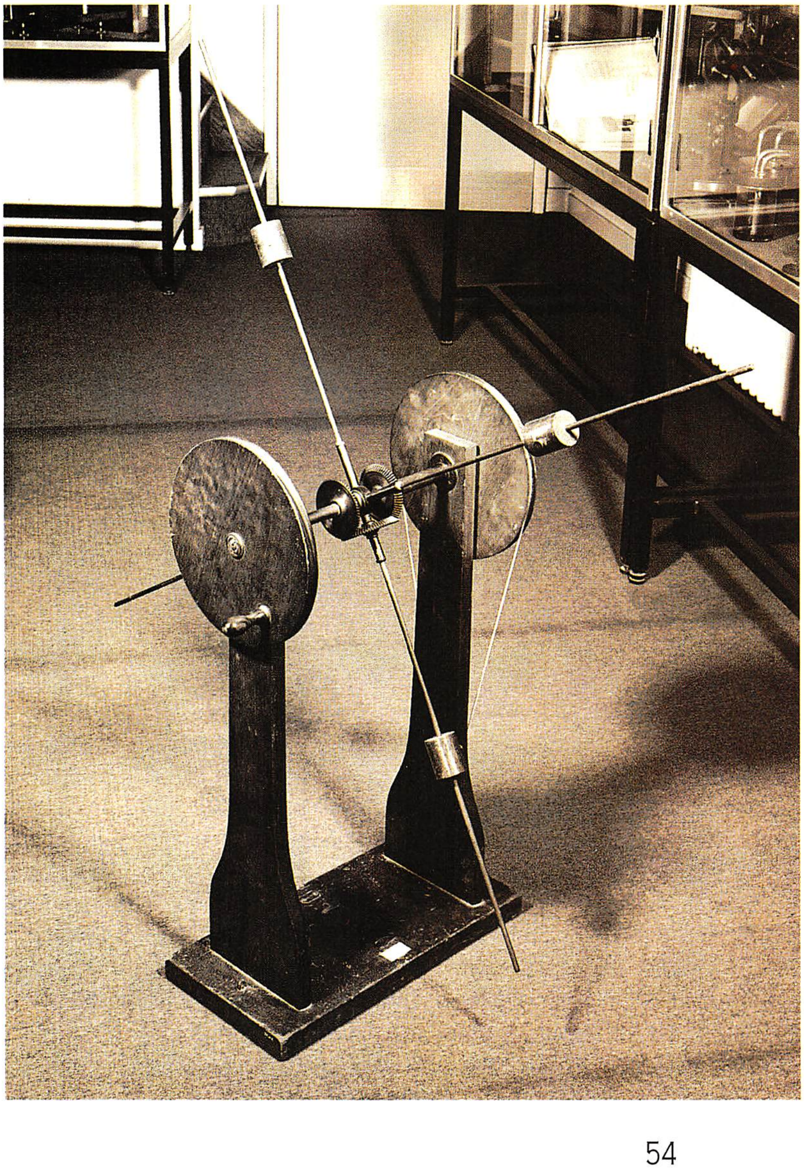



DR

L'éther électromagnétique intervient, dans l'œuvre de Maxwell, comme une visualisation mécanique de ses équations. Il propose de considérer un milieu omniprésent (à la fois dans l'espace et dans les conducteurs), mis en mouvement par le déplacement d'un courant de particules. Le courant, passant de A en B, met en rotation, par frottement, des cellules fluides (hexagones) qui forment des "tourbillons" (ici, vus en coupe), correspondant aux "lignes de force" magnétiques. On remarque que les cellules situées en haut et en bas du courant de conduction tournent dans des sens contraires, ce qui rend bien compte des deux pôles d'un champ magnétique. Le mouvement est ensuite "propagé" dans le milieu environnant par les particules voisines. Dans un conducteur, ces particules sont libres de se déplacer, et forment un courant induit. Dans l'espace ou dans un isolant, elles tournent sur place, et transmettent cette rotation aux cellules voisines, induisant ainsi la propagation du champ magnétique.




DESSIN CLAUDE LACROIX



WHIPPLE MUSEUM, CAMBRIDGE

En 1874, Maxwell construit une "maquette" mécanique pour illustrer le fonctionnement de son éther électromagnétique dans le phénomène d'induction. Les deux plateaux sont analogues à des circuits électriques conducteurs ; la force qu'on exerce sur eux simule une force électromotrice. Les pignons coniques centraux représentent l'action de l'éther occupant l'espace entre les circuits. La croix, munie de masses réglables, en introduisant une certaine inertie dans le système, correspond au coefficient d'induction. La courroie reliée au plateau de droite passe sur un galet freineur et représente la résistance du circuit secondaire. Lorsque le plateau de gauche est actionné à vitesse constante, les pignons 1 et 2 tournent librement autour du 3, et le plateau de droite reste immobile. Le courant induit est nul. Mais lorsqu'on accélère ou que l'on ralentit le mouvement du plateau de gauche, le pignon 2 prend appui sur le pignon 3 et lui imprime un mouvement : le plateau de droite se met à tourner lentement dans la direction opposée à celle de la force exercée sur le premier plateau. En conformité avec l'expérience électromagnétique, les "courants" sont de sens contraires, et seul un champ magnétique variable induit un courant dans un conducteur. La maquette de Maxwell démontre que les rapports de quantités électromagnétiques sont parfaitement "traductibles" en moments cinétiques.

sur la lumière polarisée (voir article p. 30), le magnétisme devait être un phénomène réel de rotation. Entre les cellules de Maxwell se trouvent des particules électriques en rotation. Elles fonctionnent comme un pignon de boîte de vitesses, intercalé entre deux autres pour les faire tourner dans le même sens et sans heurts. Ce système de cellules et de particules électriques est censé exister dans tout l'espace. Dans les conducteurs, les particules sont libres de se déplacer, tandis que dans les non-conducteurs – dont l'espace – elles ne sont soumises qu'à des déplacements élastiques autour de leur point d'équilibre. Dès lors, quand un courant de particules électriques est produit dans le canal AB (voir figure p. 53), leur mouvement entraîne la rotation du fluide visqueux des cellules voisines, laquelle rotation provoque un petit déplacement des particules diamétralement opposées – le "courant de déplacement" mentionné plus haut – avant qu'elles aient fait un tour sur elles-mêmes. La rotation de ces particules met à son tour en rotation la cellule voisine. Les rotations et déplacements se propagent en dehors du canal conducteur dans tout l'espace, chaque courant de déplacement entraînant une nouvelle rotation magnétique et réciproquement. Lorsqu'elles rencontrent un autre conducteur, les rotations magnétiques induisent dans ses canaux non pas un courant de déplacement, mais un courant de conduction ordinaire. L'enlacement mutuel de l'électricité et du magnétisme se propage donc de lui-même dans l'espace par simple effet mécanique, et à la vitesse de la lumière…

D'innombrables discussions ont entouré la question de savoir si Maxwell accordait quelque réalité à ce système de tourbillons. Il n'y a aucun doute, en tout cas, sur le fait qu'il voyait dans une modélisation mécanique plausible un principe de validation de la structure mathématique qu'il avait érigée.

A cette fin, il conçoit et réalise un appareil à induction formé de deux roues, reliées par un couplage inertiel (voir p. 54). La mise en rotation de la première entraîne une rotation inverse de l'autre pendant la durée de l'accélération, et vice-versa pendant une décélération. Un éther mettant en œuvre un système de cette sorte est donc physiquement possible. Cependant, pour pouvoir transmettre les oscillations transverses de la lumière, ce milieu devrait se comporter comme une espèce de solide élastique. En vérité, un étrange solide, car la lumière ne montre aucun signe des ondes longitudinales que tous les solides propagent. Dans la théorie mathématique de Maxwell, ces ondes longitudinales n'existent d'ailleurs pas. L'erreur réside-t-elle du côté du solide élastique ou de celui de la théorie ? Cette question soulèvera une véhémente discussion entre deux écoles. Nous y reviendrons.

## LA CRÉATION DES STANDARDS INTERNATIONAUX ET LA MUTATION DE L'ENSEIGNEMENT

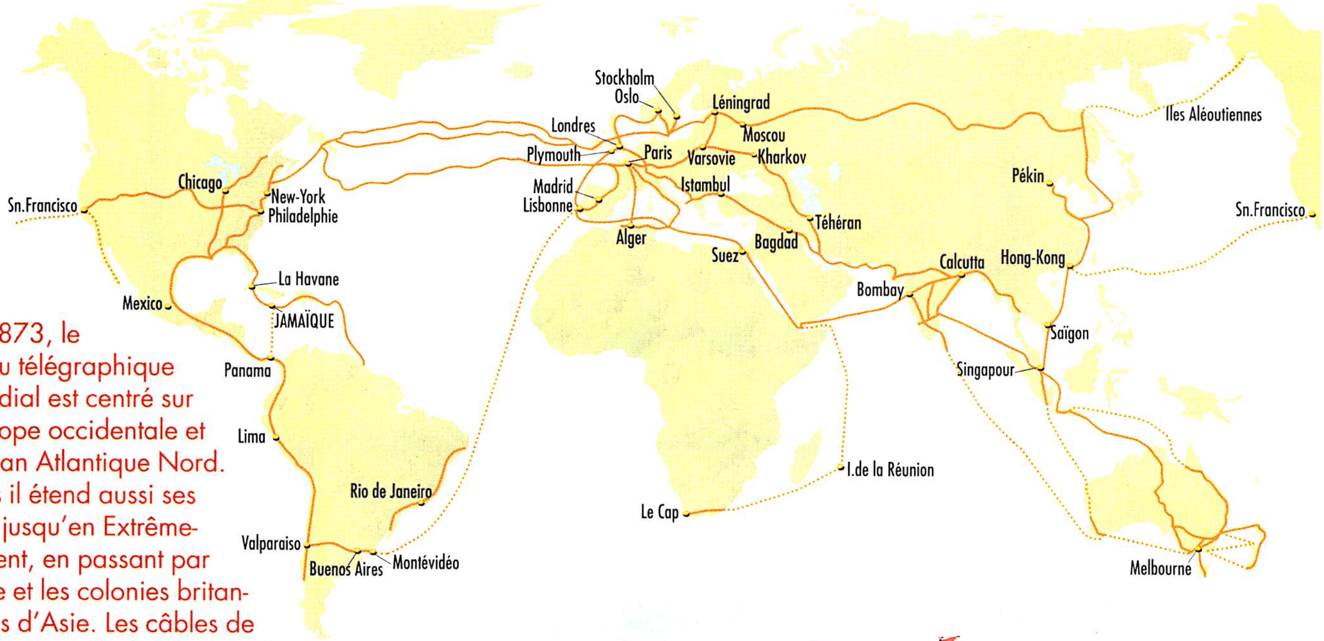
L'éther électromécanique de Maxwell de 1862 apporte une solution à un problème auquel aucun spécialiste, au milieu du XIXe siècle, ne peut échapper : quelle est la relation entre les phénomènes électriques, les phénomènes magnétiques et la lumière ? Vue sous cet angle, la contribution de Maxwell reste bien trop abstraite. Son insertion dans le machinisme et les réseaux télégraphiques de l'époque victorienne semble se limiter à une série d'analogies heuristiques sur la mécanique de la propagation de la lumière et sa structure mathématique. Autant dire qu'elle appartient au royaume "éthéré" des idées…

En réalité, le succès de son entreprise doit autant à la résolution des problèmes de transport de signaux dans les câbles télégraphiques qu'à celle des ondes lumineuses dans l'éther. Durant toute son époque, cette question domine en effet la quasi-totalité des recherches en électricité : elle engendre la majorité des problèmes théoriques, et mobilise la plus grande partie des instruments, des matériaux et des ressources humaines.

Des travaux récents ont montré l'importance, dans l'œuvre de Maxwell, de sa participation, à la fois technique et institutionnelle, à la mise en place des réseaux d'acteurs qui contribuèrent au développement du télégraphe. Les fondeurs de cuivre, les fournisseurs de gutta-percha [1], les fabricants de câbles, les ingénieurs des universités et de l'industrie, les constructeurs d'instruments et les théoriciens de la physique, sans oublier les chefs d'entreprises, les agences gouvernementales et les experts militaires, durent se mettre d'accord sur un vaste ensemble de questions. Citons pêle-mêle : la mesure de la résistance du cuivre et de la capacité d'induction de la gutta-percha ; l'optimisation des vitesses de transmission et du taux d'erreurs admissibles ; la nature des appareils d'émission et de réception ; la question de la taille et de la disposition optimales du conducteur, des isolants, et des gaines de câbles sous-marins ; celle, enfin, de la localisation des courts-circuits en eau profonde.

Maxwell se place lui-même à l'un des nœuds de cette affaire : le Comité des standards de l'Association britannique. Ce comité avait été créé par William Thomson et Fleeming Jenkin pour le contrôle des brevets des instruments télégraphiques, et par les ingénieurs du câble Latimer Clark et Charles Bright. Maxwell dirige le sous-comité chargé de la définition d'une unité standard de résistance. Cette tâche est d'une part au cœur des problèmes de maintenance et, d'autre part, a d'importantes retombées économiques : d'elle dépend en partie la définition d'une juste quantité de cuivre à inclure dans la fabrication des câbles. Enfin, elle s'intègre également dans un large projet d'établissement d'un système d'unités normalisées, sur lequel nous reviendrons plus loin.

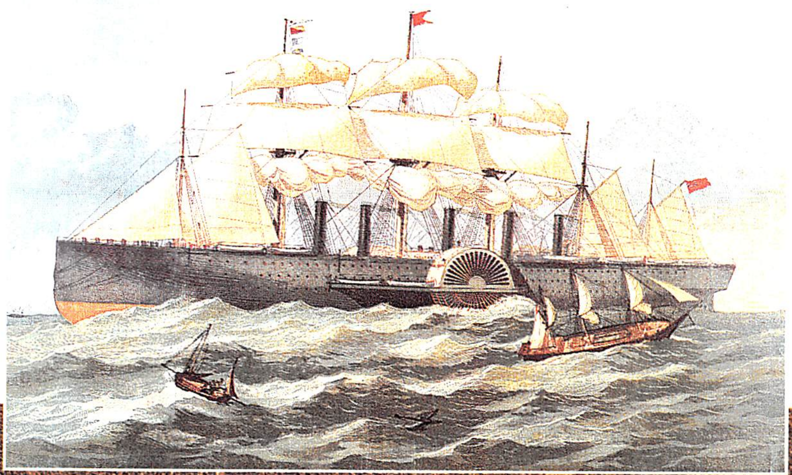
1 – Substance tirée d'un latex végétal qui, une fois solidifiée, peut servir d'isolant.



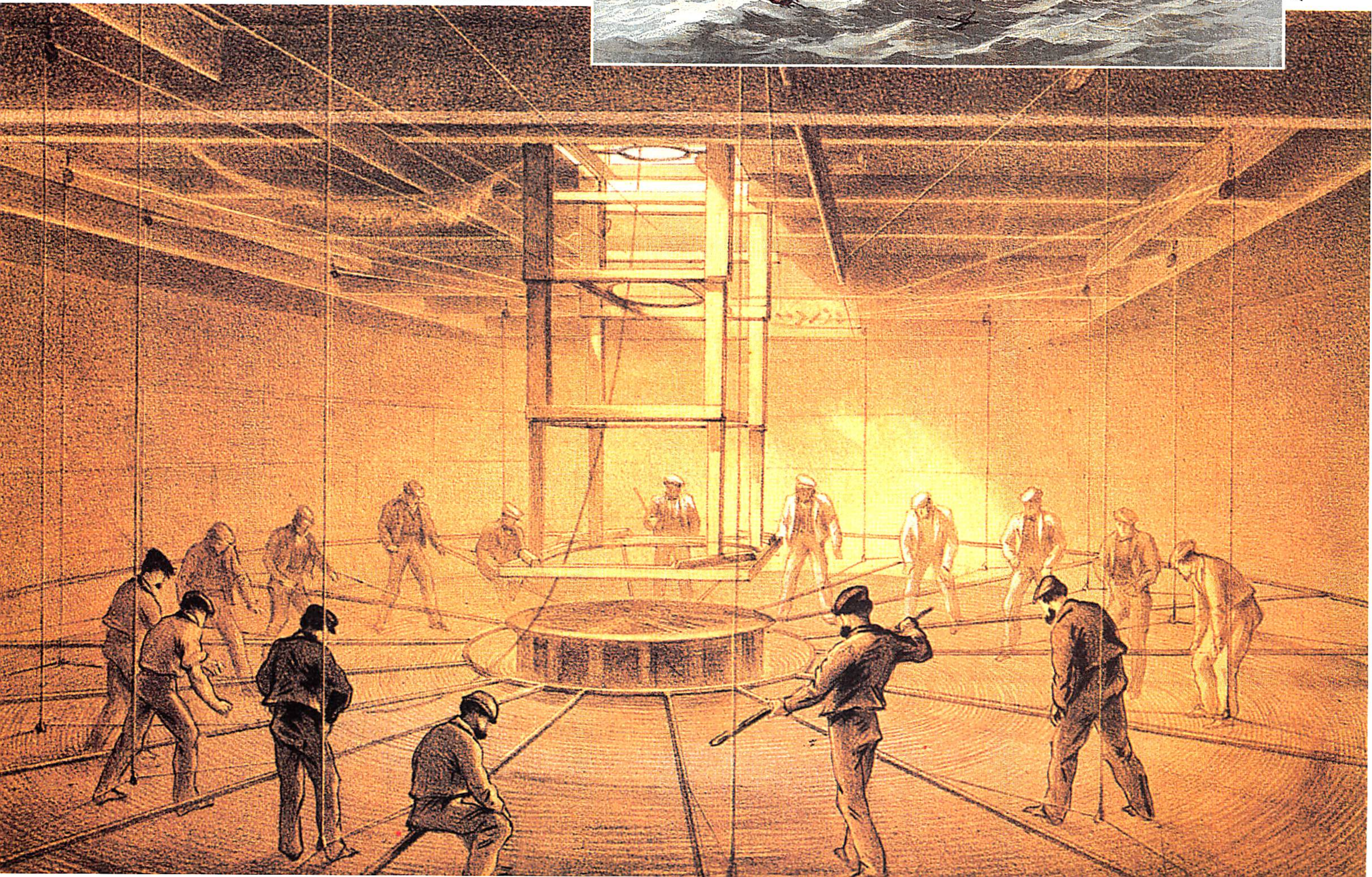

DESSIN : DOMINIQUE GALLAND

En 1873, le réseau télégraphique mondial est centré sur l'Europe occidentale et l'océan Atlantique Nord. Mais il étend aussi ses lignes jusqu'en Extrême-Orient, en passant par l'Inde et les colonies britanniques d'Asie. Les câbles de l'Atlantique Sud et transpacifiques ne sont encore que des projets (en pointillés). L'établissement du télégraphe transatlantique est, à partir de 1856, un grand projet national pour les Britanniques. Après un échec en 1858, le "Great Eastern", le plus grand vapeur de l'époque est mobilisé pour la pose du câble de 1865. 6.000 tonnes de câble sont embarquées, et déroulées en partie sur le fond de l'Océan. En raison d'une rupture, l'opération sera reprise et la liaison Londres-New York finalement établie en 1866.

MARY EVANS PICTURE LIBRARY



ANN RONAN – IMAGE SELECT



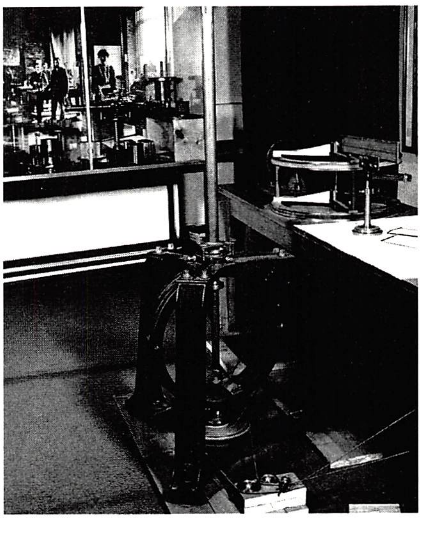
S'agissant de l'histoire de l'électromagnétisme, la présence de Maxwell à ce poste est intéressante pour deux raisons. Elle relie en effet la télégraphie, dans ses aspects politico-économiques, aux questions apparemment plus ésotériques sur la nature de la lumière. Elle a, par ailleurs, entraîné un bouleversement de la pratique d'enseignement et de recherche en physique à Cambridge.

La question initiale est d'ordre pratique : comment localiser un défaut dans un câble sous-marin long de plusieurs centaines de milles ? Considérons le défaut le plus net, une coupure du câble : à cet endroit, le conducteur est donc relié à "la terre". La technique utilisée consiste à brancher, au départ du câble, un générateur de tension, ainsi qu'un circuit parallèle muni de résistances amovibles et d'un galvanomètre. L'ensemble constitue ce que l'on appelle un pont de Wheatstone, dont l'un des sommets est "à la terre". Il permet de déterminer la résistance R du conducteur jusqu'à l'endroit du défaut. Il suffit ensuite de diviser la valeur R obtenue, par celle de la résistance du câble par unité de longueur (r). Connaissant la distance (R/r), on va ensuite repêcher le câble à l'endroit précis où la réparation est nécessaire. Cette procédure, apparemment simple, implique néanmoins une condition draconienne : il faut étalonner la résistance du câble par unité de longueur (r) avec une excellente précision. Une erreur de quelques pour cent sur cette mesure suffit en effet à induire une même erreur sur la distance R/r, soit au bilan plusieurs milles ou dizaines de milles...

Pour mesurer "r", comme toujours en pareil cas, on fait appel à des étalons : or, en 1860, les meilleurs laboratoires d'Europe sont incapables de se mettre d'accord sur des étalons de résistances, calibrés avec une précision suffisante. D'un laboratoire à l'autre, les mesures sur un même échantillon varient notablement, tandis qu'à l'intérieur d'un même laboratoire la reproduction de la mesure est plus que délicate. La définition d'une unité de résistance normalisée constitue donc une priorité essentielle pour le Comité des standards. Les enjeux économiques sont évidemment considérables...

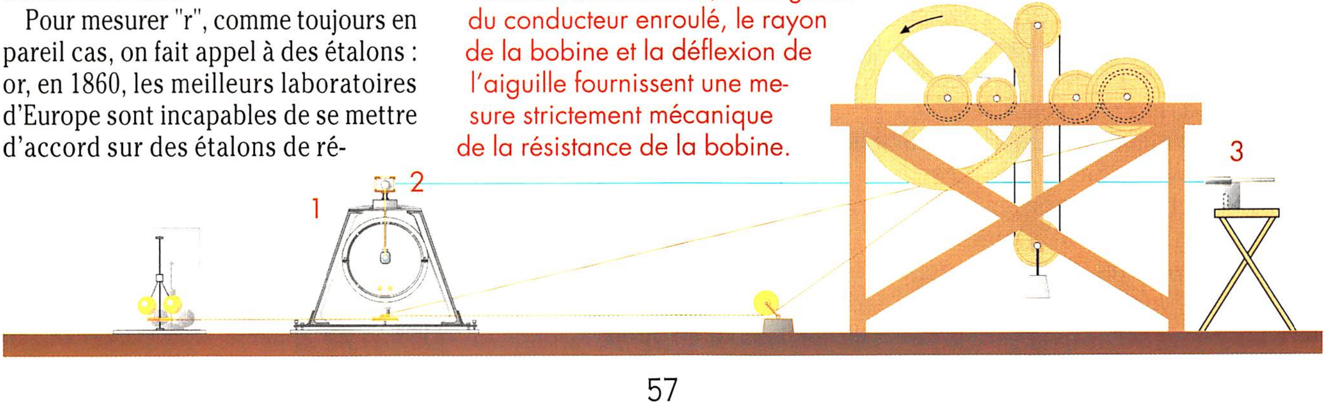
Les Allemands plaident pour l'adoption du système le plus pratique, celui de Werner Siemens : l'unité de résistance sera celle d'une colonne de mercure, de hauteur et de diamètre calibrés. La reproductibilité des mesures est facilitée. Les Britanniques ont, nous l'avons dit, une plus haute ambition : celle d'établir un système d'unités qui reflète l'unification de la physique. En vertu du principe de conservation de l'énergie, cette démarche tente de ramener la définition de toute unité habituellement utilisée dans des phénomènes différents (chimique, électrique, magnétique, thermique, etc.) à une combinaison des trois grandeurs fondamentales de la mécanique : longueur, masse et temps. Les Allemands optent pour une unité de résistance "relative", les Britanniques aspirent à définir une unité "absolue".

Il leur faut donc concevoir un dispositif qui puisse fournir des mesures mécaniques et reproductibles, c'est-à-dire, en particulier, insensibles à l'amplitude variable du champ magnétique terrestre. Thomson propose une solution élégante : si l'on met en rotation une bobine autour d'une aiguille aimantée, le courant induit dans la bobine par son propre déplacement dans le champ magnétique terrestre entraîne une déflexion de l'aiguille. Lorsque, à vitesse de rotation uniforme, l'aiguille se stabili-



WHIPPLE MUSEUM, CAMBRIDGE

La "bobine tournante" de la British Association est conçue pour établir une mesure absolue de résistance. L'appareil comprend un jeu compliqué de poulies et de courroies asservies à un régulateur mettant en rotation régulière une bobine conductrice (1). Au centre, une aiguille aimantée est suspendue à un fil qui transmet le moindre de ses mouvements à un cadran de lecture (2). Le courant induit par le mouvement de la bobine dans le champ magnétique terrestre provoque une déflexion de l'aiguille, observée à travers un objectif (3). La vitesse de rotation de la bobine, la longueur du conducteur enroulé, le rayon de la bobine et la déflexion de l'aiguille fournissent une mesure strictement mécanique de la résistance de la bobine.




DESSIN CLAUDE LACROIX

se, cela signifie que les couples de force qu'exercent sur l'aiguille le champ de la bobine et le champ magnétique terrestre s'équilibrent. Puisque le courant induit dans la bobine par le champ terrestre est proportionnel à la valeur de ce dernier, le facteur "champ magnétique" peut être évacué de l'équation des couples. Quels que soient le lieu et le temps de l'expérience, on devra obtenir la même déflexion pour la même vitesse. La longueur et le rayon du bobinage, la vitesse de rotation de la bobine et la déflexion de l'aiguille constituent alors une mesure en grandeurs purement mécaniques de la dernière variable importante : la résistance du fil conducteur de la bobine.

L'équipe rassemblée par Maxwell au King's College se charge de construire et de mettre en œuvre ce principe. Mais les difficultés sont plus grandes que prévu : même si l'amplitude du champ magnétique local est sans incidence, sa direction, elle, influe sur l'expérience. Or l'orientation du champ terrestre varie naturellement au cours d'une même journée, et chaque fois qu'un bateau passe sur la Tamise, qui n'est pas loin, sa masse métallique dévie l'aiguille...

En dépit des meilleurs experts réunis par Maxwell, l'ingénieur Fleeming Jenkin – pour la partie mécanique – Balfour Stewart – spécialiste des mesures magnétiques – Charles Hockin – ingénieur en mécanique – les résultats sont peu satisfaisants. Pour faire face à l'urgente demande de l'industrie du télégraphe, on commence néanmoins à fournir des étalons standard. Les boîtiers fabriqués par les frères Elliot de Londres, censés reproduire en tout lieu et en tout temps l'unité définie par l'Association britannique, se révèlent malheureusement incapables d'assurer la fiabilité requise. Une faille dans laquelle la concurrence s'engouffre. Werner Siemens et sa compagnie électrique alors en pleine croissance, suggèrent d'adopter leur unité, relative certes, mais fiable, définie à l'aide d'une simple colonne de mercure.

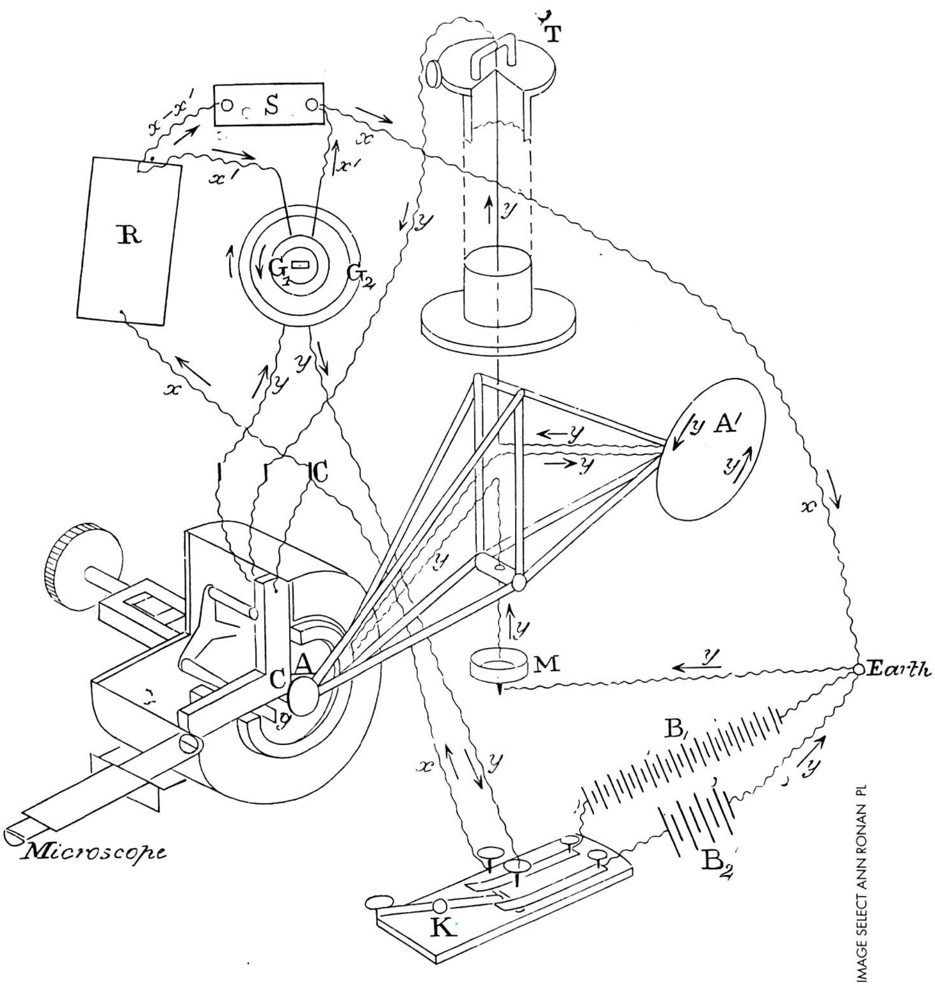
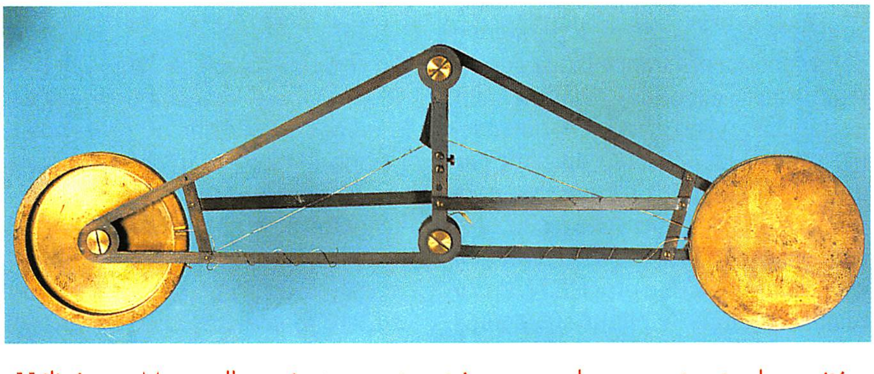



IMAGE SELECT ANN RONAN PL



CAVENDISH LABORATORY

Utilisé par Maxwell, cet instrument sert à mesurer le rapport entre les unités électrostatiques et électromagnétiques. Ce rapport, qui intervient dans ses équations, a la dimension d'une vitesse et sa valeur doit être celle de la vitesse de la lumière. La partie mobile de l'appareil est suspendue à un fil. A gauche, un disque de cuivre et une bobine conductrice, isolés l'un de l'autre (A); à droite du bras de la balance, un simple disque (A') servant à équilibrer l'action magnétique terrestre sur les deux disques du bras mobile. L'ensemble disque-bobine mobile A est opposé à un même ensemble fixe (C), dont la position est réglable par une vis micrométrique. Les deux disques sont connectés à une grosse batterie ($B_1$); dans les deux bobines, circule un courant (y) fourni par la batterie $B_2$. Lorsque l'appareil s'immobilise dans une certaine position, la force électrostatique des deux disques (qui se repoussent) et la force électromagnétique des bobines (qui s'attirent) sont équilibrées. A l'aide des mesures sur les galvanomètres ($G_1$ et $G_2$), on peut calculer ce fameux rapport entre unités électrostatiques et électromagnétiques. La valeur moyenne (sur 12 mesures) donnée par Maxwell est de 2, 8798 x $10^{10}$m/s, soit 288.000 km/s, ce qui, compte tenu du dispositif, est une bonne approximation de la vitesse de la lumière (300.000 km/s).

# Abonnez dès aujourd'hui vos enfants à Science & Vie Junior.

**Le monde de demain,
ce sont vos enfants
qui le feront.
Et comme on ne fait bien
que ce que l'on connait bien,
SCIENCE & VIE JUNIOR
leur propose chaque mois
des articles et des dossiers
qui les passionnent.
L'actualité scientifique,
l'infiniment grand,
l'infiniment petit, hier,
aujourd'hui, demain...
SVJ explore tout ce
qui fait le monde.
Sérieux et distrayant,
complet et concret,
SCIENCE & VIE JUNIOR
apprend à vos enfants
le plaisir de comprendre.**

## BULLETIN D'ABONNEMENT

à retourner avec votre règlement à SCIENCE & VIE JUNIOR 1, rue du Colonel Pierre Avia 75 503 PARIS CEDEX 15

**OUI**
**JE M'ABONNE**

**1an à SVJ / 11 N° : 223 F** au lieu de 245 F*.

**. Ci-joint mon règlement à l'ordre de SCIENCE & VIE JUNIOR**

**VOUS POUVEZ AUSSI VOUS ABONNER SUR MINITEL EN TAPANT 3615 ABON**

En application de l'article L 27 du 06/01/78, les informations demandées dans votre bon de commande sont nécessaires au traitement de ladite commande. Les catégories de destinataires sont uniquement celles liées à l'exécution du contrat et aux services associés du Groupe. Vous pourrez accéder aux informations et procéder éventuellement aux rectifications nécessaires.

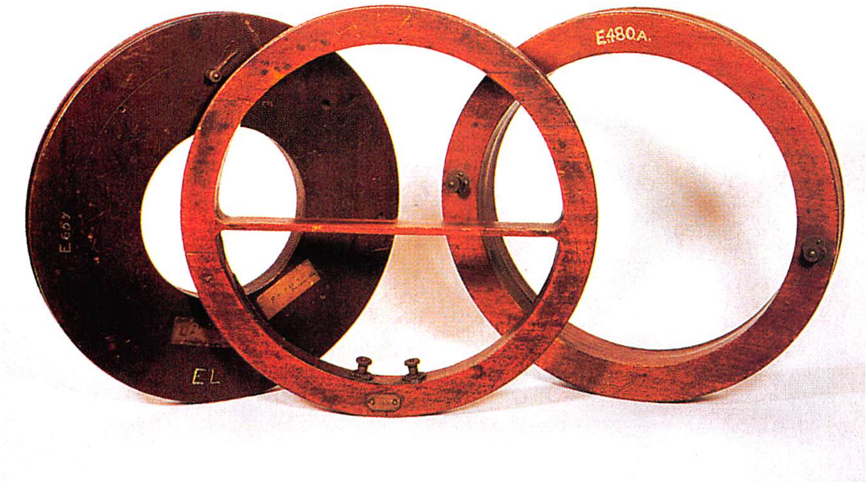
OFFRES VALABLES JUSQU'A FIN 1993 ET RESERVEES A LA FRANCE METROPOLITAINE RCPARIS B 572 134 773

NOM ____________________
PRENOM ____________________
ADRESSE ____________________
____________________
CODE POSTAL __________ VILLE ____________________
ANNEE DE NAISSANCE __________ CLASSE __________

*Prix de vente chez votre marchand de journaux.

CSV17/CJWB

Les deux bobines de résistance standard de gauche et de droite sont celles que Rayleigh fit parvenir au laboratoire de Henry Rowland, à Baltimore, pour en vérifier la mesure de résistance.

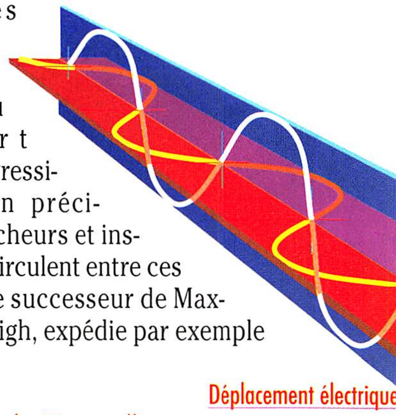



WHIPPLE MUSEUM, CAMBRIDGE

La situation de l'unité britannique s'améliore quand Maxwell prend la direction du nouveau Laboratoire Cavendish de Cambridge, en 1871. Ses premières dispositions sont en effet d'inscrire la question de la définition de l'Ohm britannique au programme du laboratoire et des enseignements. Une telle orientation exige que les meilleurs étudiants de Cambridge, normalement appelés à des carrières distinguées de juristes ou d'ecclésiastiques, se soumettent à la rigoureuse discipline qu'impose la pratique des mesures de précision. Maxwell, qui fait appel aux meilleurs spécialistes du moment, dont Robert Fulcher, appartenant à la Compagnie d'instruments de Cambridge, ne peut réussir l'œuvre entreprise. La mort interrompt sa tâche. C'est son successeur, Lord Rayleigh, qui fera aboutir ce projet. Il parviendra non seulement à fixer l'organisation des études, mais à mettre au point une valeur standard de l'Ohm. Cette dernière est acceptée provisoirement en 1881 par un Comité international des mesures, au terme d'un débat animé entre Thomson, Helmholtz et d'autres, sur les mérites respectifs des propositions britanniques et allemandes. Comme toujours, un compromis est signé : il revient à l'Association britannique de définir la valeur de l'Ohm en unités absolues, et à Siemens d'en reproduire la mesure à l'aide d'une colonne de mercure...

Tout en consacrant des moyens considérables à ce projet, Maxwell se préoccupe également de valider par l'expérience son hypothèse unificatrice : les ondes électromagnétiques doivent se propager très précisément à la vitesse de la lumière. Certes, il n'a à sa disposition aucun appareillage électromagnétique susceptible de produire de telles ondes. Mais un chemin détourné se présente. Son modèle mécanique fait en effet apparaître une quantité liée à la vitesse de la lumière : le rapport entre unités de forces électromagnétique et électrostatique. Or, le problème des câbles télégraphiques – encore lui – offre l'occasion de mesurer ce rapport. Faraday et Thomson avaient analysé la propagation des signaux sous la forme d'un rapport entre, d'une part la conduction du courant le long du fil de cuivre et, d'autre part, la charge statique induite, à travers l'isolant, entre le noyau et le blindage. Dans ces phénomènes, la **résistance** au flux de courant est une donnée essentielle. Où l'on voit que les travaux de Maxwell sur la mesure des résistances ont un second objectif, moins directement lié à la demande immédiate de l'industrie télégraphique. Par ces mesures, il s'agit aussi d'étayer sa théorie électromagnétique de la lumière en vérifiant expérimentalement que le rapport entre unités électromagnétique et électrostatique a bien la valeur de la vitesse de la lumière.

Cette fois encore, les résultats sont décevants. Les mesures divergent allègrement. Tout comme dans le cas de la définition de l'unité de résistance, l'accord d'un vaste réseau d'expérimentateurs est sollicité. A l'époque, de nombreux laboratoires de physique et d'électricité appliquée se sont ouverts ou développés, à Glasgow, Londres, Göttingen, Tokyo, Baltimore, Paris, Cleveland. Des équipes dirigées par Thomson, Hockin, Weber et Friedrish Kohlrausch, W.E. Ayrton, et John Perry, Henry Rowland, Léon Foucault et A.A.Michelson refont les mesures par des méthodes variées. De mêmes échantillons sont soumis à des contrôles croisés et la mesure du rapport gagne progressivement en précision. Chercheurs et instruments circulent entre ces centres. Le successeur de Maxwell, Rayleigh, expédie par exemple




DESSIN A. MEYER

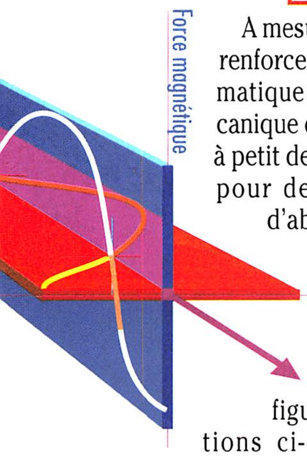
Le *Traité* de Maxwell comporte un schéma, analogue à celui-ci, décrivant la propagation d'une onde électromagnétique simple, une onde plane : les "perturbations" électrique et magnétique s'exercent dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation (flèche mauve), et elles sont perpendiculaires entre elles (plans bleu et rouge)

les bobines du Cavendish à Baltimore, afin de voir si ses résultats sont reproductibles. Chaque échange apporte sa moisson de nouveaux problèmes, de nouvelles méthodes, de nouveaux équipements, de nouvelles corrections, avant que la vitesse de la lumière soit, enfin, adoptée comme constante de relation entre unités.

Aujourd'hui, ce résultat nous apparaît sous la forme d'une découverte, issue de la théorie maxwellienne de l'enlacement mutuel des lignes électrique et magnétique. Elle nous semble en être une conséquence évidente, une loi de la nature. L'histoire nous montre en réalité que ce remarquable succès met en jeu un impressionnant collectif, rassemblé dans un vaste réseau : il suffit de suivre les lignes de communication reliant laboratoires, ateliers, fournisseurs de cuivre et de gutta-percha, fabricants d'instruments, et assemblées d'experts.

Dans ce réseau, Maxwell occupe un carrefour, un point de convergence entre mathématiques, modèles, matériaux, étudiants, mécanique et contacts internationaux. L'idéogramme de l'enlacement mutuel des lignes de force peut parfaitement servir à symboliser ces diverses activités humaines.

## Epilogue




A mesure que les mesures renforcent la théorie mathématique de Maxwell, sa mécanique de l'éther perd petit à petit de sa crédibilité. Cela pour deux raisons. Tout d'abord, chez Maxwell, la charge électrique (que, pour des raisons de simplicité, on n'a pas fait figurer dans les équations ci-dessus), n'a pas d'existence matérielle. Elle n'est comprise qu'en tant que manifestation d'un phénomène, celui d'une contrainte de l'éther. Elle n'apparaît ainsi qu'au bout des "lignes de déplacement". Du coup, des phénomènes aussi fondamentaux que les courants électriques sont difficiles à interpréter : les signaux dans les câbles télégraphiques, par exemple, doivent être décrits comme des ondes se propageant dans l'isolant plutôt que dans le conducteur. Ces problèmes disparaissent dans les années 1890 : sous l'impulsion des travaux théoriques de H. A. Lorentz et de J. Larmor et les expériences de J. J. Thomson, l'électron devient le support matériel de la charge électrique.

La deuxième raison tient dans l'échec du programme que Maxwell lui-même s'était assigné dans la dernière phrase de son *Traité* : « *Toutes ces théories conduisent à concevoir un milieu dans lequel se produit la propagation ; et si nous admettons l'hypothèse de ce milieu, je crois qu'il doit tenir une place prédominante dans la suite de nos recherches, et que nous devons essayer de combiner dans notre esprit et de nous représenter tous les détails de son action.* » Or, ni Maxwell, ni d'autres, qu'il s'agisse de ses héritiers directs G.F. FitzGerald, O. Lodge et O. Heaviside, ou d'adversaires aussi puissants que William Thomson, ne parviennent au cours des années 1890, en dépit d'efforts ingénieux, à imaginer un solide élastique qui constituât un éther pleinement convaincant.

A cette époque, Heinrich Hertz, a déjà délaissé tous ces modèles, et énoncé son célèbre jugement : « *La théorie de Maxwell, ce sont ses équations* ». Moins tranchants, FitzGerald et Heaviside défendent l'idée du solide élastique comme métaphore de l'éther, une simple analogie porteuse des propriétés données par les équations de champ, sans réalité substantielle. Thomson, du haut de son siège de Lord – le titre de Lord Kelvin lui fut donné en 1892 –, condamne leurs prises de position – surtout celle de Hertz – qu'il qualifie de "nihilistes".

Rétrospectivement, cette querelle semble constituer un moment clé de l'émergence du "modernisme", en physique comme dans la société occidentale en général. L'exigence d'une description mécanique des réalités ultimes de la nature commence à perdre rapidement du terrain devant l'idée positiviste selon laquelle l'homme ne peut espérer faire mieux que produire une description correcte du réel, exprimée abstraitement sous la forme d'une théorie mathématique cohérente. Le langage mathématique en vient progressivement à définir les propriétés du monde physique (non sans respecter les données de l'expérience). La théorie de la relativité et la mécanique quantique sont les exemples les plus célèbres de ce changement d'objectif.

Les "équations de Maxwell" sont donc à cet égard l'une des pierres fondatrices de la physique moderne, même si leur formulation actuelle est très peu représentative de la culture dans laquelle Maxwell puisa les moyens qui lui permirent de les énoncer. ■

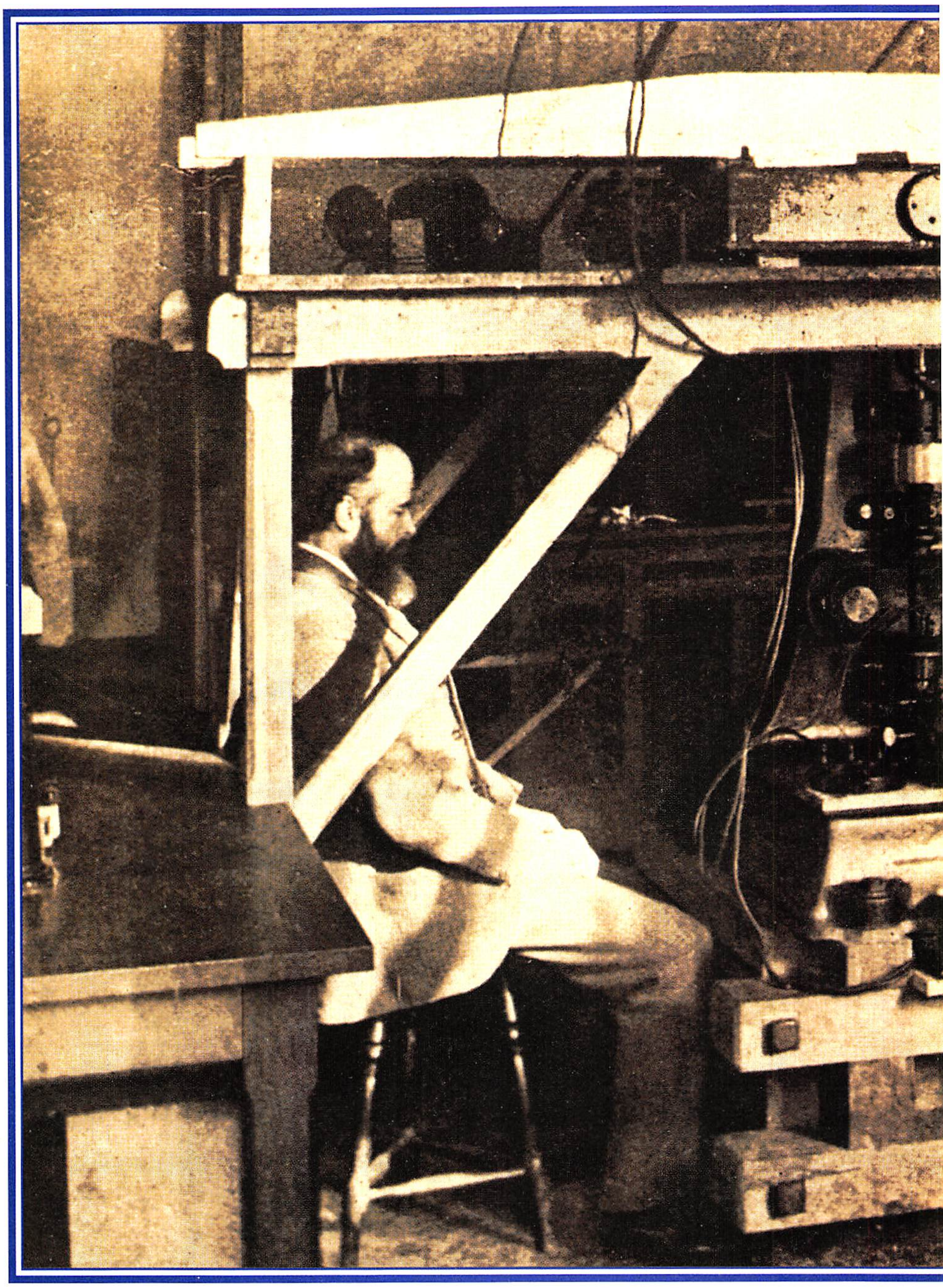
**Remerciements**
Les informations et l'inspiration de la troisième partie de cet article doivent beaucoup aux travaux récents de Simon Schaffer. Son équipe de Cambridge présente actuellement au Musée Whipple une importante exposition, intitulée "l'Empire de la physique", sur la recherche en électricité menée au laboratoire Cavendish et la technologie électrique de l'époque victorienne. Plusieurs illustrations figurant dans cet article nous ont été fournies par eux.

**Pour en savoir plus**
– J. C. Maxwell, *Traité d'électricité et de magnétisme*, traduit en 1887, réédition Jacques Gabay, Paris, 1989.
– J. Cazenobe, *La visée et l'obstacle*, étude et documents sur la préhistoire de l'onde hertzienne, Centre de documentation sciences humaines/CNRS, Paris, 1983.
– J. Hendry, *J. C. Maxwell and the Theory of the Electromagnetic Field*, Adam Hilger, Londres, 1986 .
– C. Smith et M. N. Wise, *Energy and Empire, A biographical Study of Lord Kelvin*, Cambridge University Press, Cambridge-New York, 1989.

# La Moisson des

L'ŒUVRE QUE MAXWELL LAISSA DERRIÈRE LUI N'ÉTAIT NI TRÈS CLAIRE, NI TRÈS UTILISABLE. POUR LA FAIRE ENTRER DANS L'HISTOIRE, IL FALLUT QU'UNE POIGNÉE DE MAXWELLIENS LUI TAILLE DE NOUVEAUX HABITS, CEUX QU'ON LUI CONNAÎT AUJOURD'HUI. MAIS MÊME AINSI REVÊTUE, LA PHYSIQUE DES MAXWELLIENS CONTINUAIT D'ENVELOPPER DE BIEN ANTIQUES MÉCANIQUES. LEURS EFFORTS DEVINRENT COUP DE MAÎTRE LORSQU'EN 1887, UN PHYSICIEN ALLEMAND NOMMÉ HERTZ MONTRA QUE LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES EXISTENT DANS L'ESPACE.

PAR BRUCE HUNT



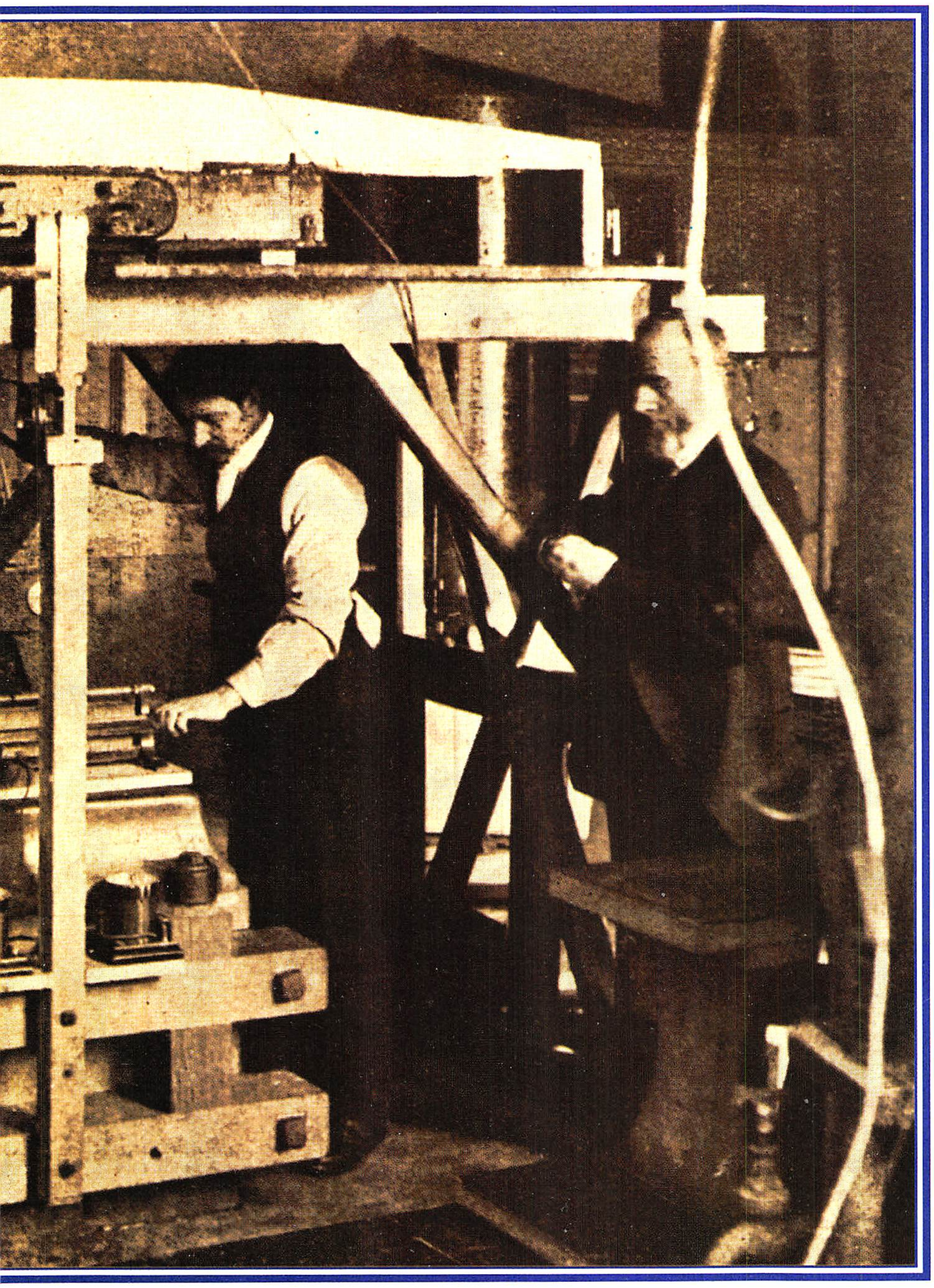
THE SCIENCE MUSEUM, LONDRES

Oliver Lodge, éminent maxwellien, expérimenta vers 1890 une machine destinée à mesurer le "mouvement" de l'éther.

Feu Richard Feynman, le célèbre physicien américain, écrivit un jour que « *du point de vue de l'histoire de l'humanité... il est très probable que la découverte par Maxwell des lois de l'électrodynamique sera considérée comme l'événement le plus marquant de tout le XIX*[e] *siècle. Même la guerre civile américaine*, ajouta-t-il, *passera pour une petite histoire d'intérêt local à côté de cet événement autrement décisif des années 1860.* » Exagération mise à part, le propos de Feynman montre bien le prestige considérable dont jouit la théorie de Maxwell – et surtout ses quatre fameuses équations – auprès des physiciens et des ingénieurs. Ces équations restent essentielles à notre compréhension des phénomènes électriques, en particulier la propagation des ondes électromagnétiques et le transport de l'énergie. Elles sont donc à la base d'un certain nombre de technologies modernes, et leur avènement marque, à bien des égards, le début de l'ère de l'électricité.

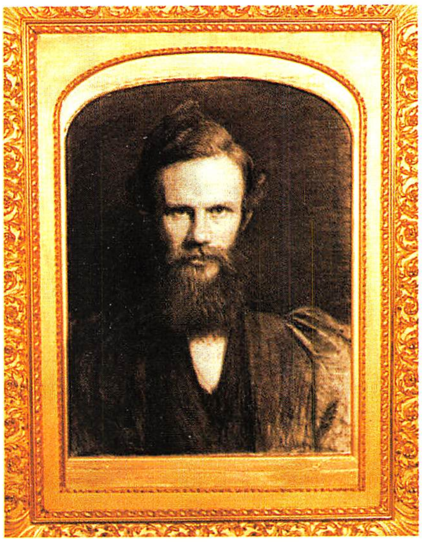
Mais les théories scientifiques sortent rarement toutes faites du cerveau d'un seul homme. Elles peuvent être si finement retravaillées et interprétées qu'au moment de leur fixation ou de leur diffusion dans la culture scientifique, elles ne ressemblent plus que de loin à leur formulation première. Le fait de donner aux

# S MAXWELLIENS



de détecter les ondes électromagnétiques. A la mort de Maxwell, en 1879, nombreux étaient ceux qui considéraient son œuvre comme très importante, mais seule une poignée de scientifiques arrivait à la comprendre, à l'accepter ou à l'utiliser.

La tâche qui consistait à lui donner une forme cohérente et utilisable, à élargir son champ d'application et à expérimenter ses conséquences, échut à un petit groupe de jeunes chercheurs, en majorité britanniques, qu'on appellera les "maxwelliens". De 1879 à 1894, entraînés par George Francis FitzGerald (1851-1901), Oliver Lodge (1851-1940) et Oliver Heaviside (1850-1925), appuyés plus tard par le physicien allemand Heinrich Hertz (1857-1894), ils transformèrent la matière abondante et confuse du *Traité* en une théorie solide, concise et vérifiée, au moins dans l'espace. C'est la "théorie de Maxwell" telle que nous la connaissons aujourd'hui. Le mérite revient à ces physiciens d'avoir prédit et montré par l'expérience l'existence et les propriétés des ondes électromagnétiques. C'est à eux que l'on doit d'avoir ramené à une petite poignée la longue liste d'équations propo-



J. B. YEATS TRINITY COLLEGE, DUBLIN

George F. FitzGerald fut un des principaux artisans de la mise en forme de la théorie de Maxwell.

théories le nom de leur premier auteur a tendance à occulter le processus historique par lequel elles arrivent à maturité. C'est ainsi que l'on finit par attribuer toute la science newtonienne à Newton et tout le darwinisme à Darwin. De même, on attribue sans sourciller les équations de champs électromagnétiques à Maxwell. Or, cela n'est pas tout à fait juste. Une bonne part de ce que nous appelons aujourd'hui "théorie de Maxwell" – équations comprises – n'est pas l'œuvre de Maxwell lui-même, mais de ses successeurs immédiats.

L'exposé le plus complet de Maxwell, celui de son *Traité sur l'électricité et le magnétisme* (1873), ne contient ni les quatre équations vectorielles qui portent aujourd'hui son nom, ni la moindre indication sur la manière de produire et

sée par Maxwell. Ces hommes furent aussi les artisans de l'application de ces équations à des techniques qui sont, aujourd'hui, responsables de la transformation de notre vie quotidienne.

Cette synthèse fut un travail de groupe, au sens fort du terme. Bien que géographiquement dispersés – FitzGerald à Dublin, Lodge à Liverpool, Heaviside à Londres et Devon, Hertz en Allemagne – les maxwelliens constituèrent une véritable équipe, active et unie. Chacun d'eux y participa selon sa personnalité, sa culture, et ses talents particuliers. Ce travail collectif leur permit ainsi de réaliser bien plus que ce qu'ils auraient pu atteindre individuellement.

FitzGerald fut, à bien des égards, le plus inventif du groupe. Heaviside l'appelait "notre ami aux brillantes idées". Issu de la frange intellectuelle, peu nombreuse mais active, des protestants d'Irlande, FitzGerald fit toute sa carrière, de 16 à 49 ans, au Trinity College de Dublin. Il n'était pas précisément homme à s'installer régulièrement à son bureau pour rédiger patiemment une œuvre de longue haleine : la plupart de ses articles sont très courts, et il ne parvint jamais à achever la rédaction d'un livre. Néanmoins, il excellait dans la critique et la production d'idées nouvelles. Ainsi, l'hypothèse qu'il formula en 1889 devait devenir célèbre plus tard, à l'époque de la théorie de la relativité d'Einstein. Elle naquit d'une conversation avec Lodge sur les résultats négatifs des expériences de mesure du "vent d'éther". FitzGerald se servit des équations de charges en mouvement proposées par Heaviside pour montrer qu'on devait s'attendre à ce qu'un objet en mouvement dans l'éther se contracte dans la direction du mouvement, juste assez pour compenser les effets qu'on cherchait à observer dans ces expériences. Cette proposition a gardé le nom de "contraction de FitzGerald"(1).

Lodge apporta aux maxwelliens des qualités différentes et complémentaires : expérimentateur compétent et théoricien rigoureux, il fut aussi le porte-parole infatigable du groupe. Fils d'un marchand de porcelaine du Staffordshire, Lodge se détourna de l'affaire familiale peu après vingt ans et se consacra aux sciences avec passion. Après des études rondement menées à l'université de Londres, il s'assura, en 1881, une chaire de professeur de physique au University College de Liverpool, qui venait d'être créé. Partisan dès cette époque des idées de Maxwell, il s'employa ensuite pendant dix ans à les renforcer et à les faire connaître. Il donna notamment une série de conférences intitulée *Les conceptions modernes de l'électricité*, qui parurent séparément dans la revue *Nature* , puis furent publiées sous forme de livre. En se servant d'une série de modèles mécaniques pour décrire les phénomènes électriques, Lodge parvint à faire passer les idées de Maxwell auprès d'un large public, qui n'était sans doute pas en mesure de comprendre une simple série d'équations, ni de s'en satisfaire.

## UN TÉLÉGRAPHISTE DE GÉNIE

Oliver Heaviside fut le plus original et peut-être le plus fécond des maxwelliens. Son meilleur ami le décrivit un jour comme « *un excentrique de première classe* », mais qui, se sentait-il obligé d'ajouter, *était loin d'être un handicapé mental* ». Ex-télégraphiste et génie mathématique autodidacte, Heaviside se chargea de faire la plupart des calculs compliqués que demandait le travail de synthèse des maxwelliens. C'est à lui que l'on doit la mise en forme, en 1884-1885, des quatre équations dites aujourd'hui de Maxwell. En même temps, Heaviside formula une nouvelle théorie de la propagation des signaux télégraphiques : ils n'étaient plus considérés comme une série de décharges électriques se déplaçant à l'intérieur d'un fil, mais comme des ondes se propageant autour de lui, c'est-à-dire comme des ondes électromagnétiques dans l'éther environnant.

Heaviside réalisa ces travaux tout en vivant auprès de ses parents, dans un endroit que Lodge, lors d'une visite en 1889, qualifia de "sinistre garni" londonien. En dehors de quelques vacations pour la compagnie du câble télégraphique de la mer du Nord – fin1860 début 1870 – il n'exerça jamais d'emploi régulier. Sa santé fragile et son caractère ombrageux le coupaient des contacts humains ordinaires. La fascination qu'il éprouvait pour les phénomènes qu'il avait observés en travaillant sur le câble représenta le lien le plus durable et le plus solide entre lui et le monde extérieur. Il consacra sa vie entière à l'étude et à l'amélioration de la propagation des signaux. Ses uniques revenus lui vinrent des articles qu'il écrivit pour

INST. OF ELECTRICAL ENGINEERS, LONDRES

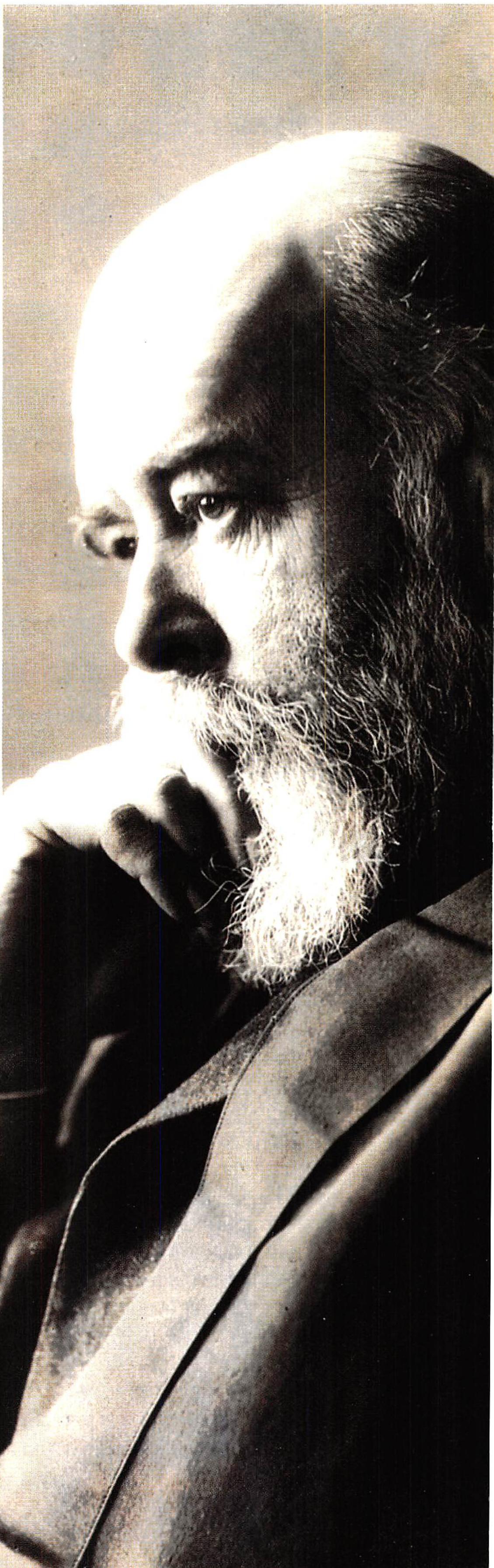
**1** – Egalement appelée contraction de FitzGerald-Lorentz, car le physicien néerlandais Hendrik A. Lorentz fit, à peu près à la même époque, une proposition identique pour rendre compte des résultats négatifs de l'expérience de Michelson et Morley. Voir Cahiers de Science et Vie n°16, p. 61.

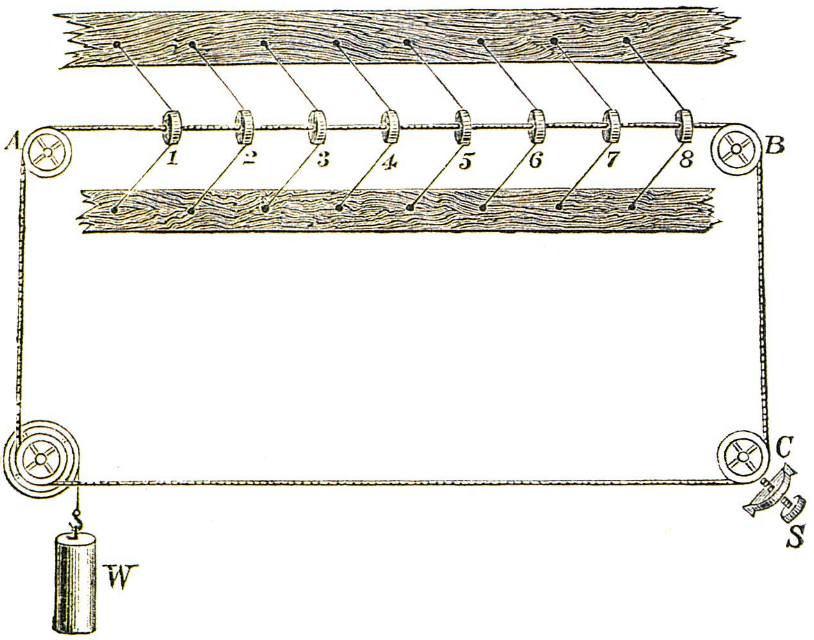
*L'électricien*, un hebdomadaire économique qui appartenait aux sociétés de câble .

Les deux premiers maillons de la chaîne maxwellienne furent réunis en 1878. Cette année-là, FitzGerald et Lodge se rencontrèrent à la réunion annuelle de la British Association for the Advancement of Science. Rapprochés par leur admiration commune pour la théorie de Maxwell, ils nouèrent rapidement une relation amicale. Lettres, visites et discussions animées sur les arcanes de la notion de champ électromagnétique suivirent bientôt. Ils se posèrent une question que Maxwell n'avait jamais traitée : par quel moyen produire des ondes électromagnétiques se propageant dans l'éther et en particulier des ondes de longueur supérieure à celle de la lumière ? En réponse à une question de Lodge, FitzGerald, après s'être longtemps battu contre une erreur d'interprétation d'une équation essentielle, prédit en 1882 que des ondes métriques devaient être produites par la décharge d'un condensateur. Il calcula même la manière dont la puissance rayonnée devrait varier en fonction de la taille du circuit et de sa fréquence d'oscillation. Mais ni lui, ni Lodge ne voyaient comment obtenir, à l'aide d'un condensateur, des ondes assez courtes pour être visibles. Ils ne trouvèrent pas non plus le moyen de détecter les ondes de plus grande longueur que celles qu'ils obtenaient avec un condensateur ordinaire. Ils avaient de bonnes raisons de penser que les ondes électromagnétiques étaient assez faciles à produire, « *le grand problème étant*, comme le nota FitzGerald

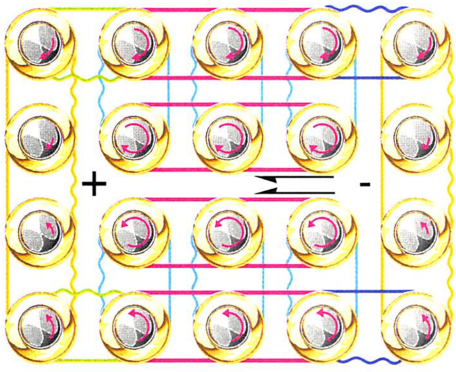
Oliver Heaviside fut le mathématicien du groupe des maxwelliens. Oliver Lodge (à droite, vers 1912) s'efforça de traduire la théorie de Maxwell dans un langage accessible.

THE SCIENCE MUSEUM, LONDRES






D. MALARTRE - MÉDIATHÈQUE D'HIST. DES SCIENCES




DESSIN D. GALLAND

La physique des maxwelliens s'exprima en une débauche de modèles mécaniques. En haut, par Lodge : système à cordes et poulies simulant la charge d'un condensateur. Les billes tenues par des élastiques figurent les particules d'éther déplacées. Ci-contre, l'appareil à galets de FitzGerald : l'application d'une charge est traduite par une contrainte appliquée aux galets centraux (flèches). Cette rotation partielle est propagée par les courroies dans le système environnant et se traduit par des tensions et des relâchements.

en 1884, *de trouver un moyen de percevoir ces courants à alternance rapide* ».

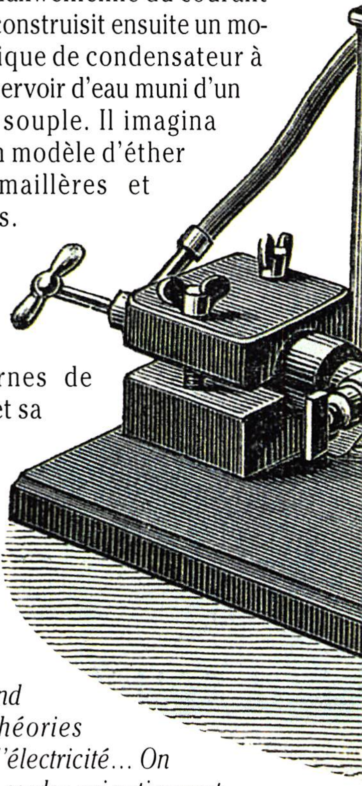
Convaincus de l'existence des ondes électromagnétiques, mais placés dans une impasse par l'absence de détecteur, Lodge et FitzGerald se tournèrent vers d'autres problèmes. Dans les années 1880, ils se consacrèrent en particulier à la conception de modèles mécaniques d'éther. Tout comme la plupart des physiciens britanniques de l'époque, ils pensaient que l'Univers entier – éther électromagnétique compris – devait être réduit à des interactions purement mécaniques. Ils ne considéraient donc pas les modèles mécaniques comme de simples supports utiles à la pensée, mais comme des outils de recherche à part entière, utilisables pour atteindre la vraie nature du champ électromagnétique. Maxwell en avait usé de la même manière. Son modèle d'éther à "tourbillons et pignons" de 1861 avait joué un rôle important dans la genèse de sa théorie.

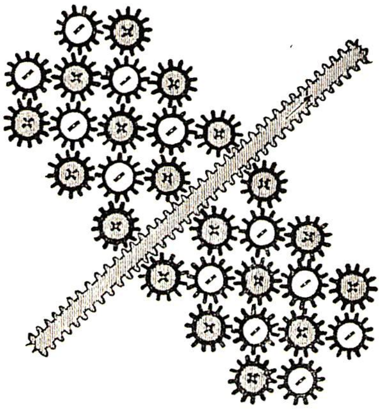
En 1885, FitzGerald conçut et construisit un modèle – « *plutôt joli, avec une tablette de cèdre et des roues de laiton rutilant* » – consistant en un réseau de roues tournant sur des axes verticaux et entre lesquelles le contact était assuré par des bandes de caoutchouc. Conçu à l'origine pour illustrer certains points de la théorie maxwellienne, le modèle finit par inspirer à FitzGerald une confiance plus grande que les équations. A un moment de son analyse de la propagation des forces électromagnétiques, il trouva que les fonctions de potentiels de Maxwell ne correspondaient à rien dans son modèle : plutôt que d'abandonner le modèle, il préféra abandonner les fonctions ! Or, cette confiance de FitzGerald dans son modèle mécanique allait lui faire faire un grand pas dans la refonte de la théorie de Maxwell.

## MÉCANIQUES VARIÉES

Lodge, plus encore que FitzGerald, était porté à l'usage des modèles. Un de ses premiers articles portait sur une analogie mécanique : une boucle passant par une série de billes suspendues à des élastiques à l'intérieur d'un cadre, qu'il avait conçue pour illustrer la conception maxwellienne du courant électrique. Il construisit ensuite un modèle hydraulique de condensateur à l'aide d'un réservoir d'eau muni d'un diaphragme souple. Il imagina également un modèle d'éther fait de crémaillères et d'engrenages. Tous figurent dans son livre sur les conceptions modernes de l'électricité, et sa lecture inspira au physicien français Pierre Duhem la remarque suivante :

« *Voici un livre qui prétend exposer les théories modernes de l'électricité... On n'y trouve que cordes qui actionnent*

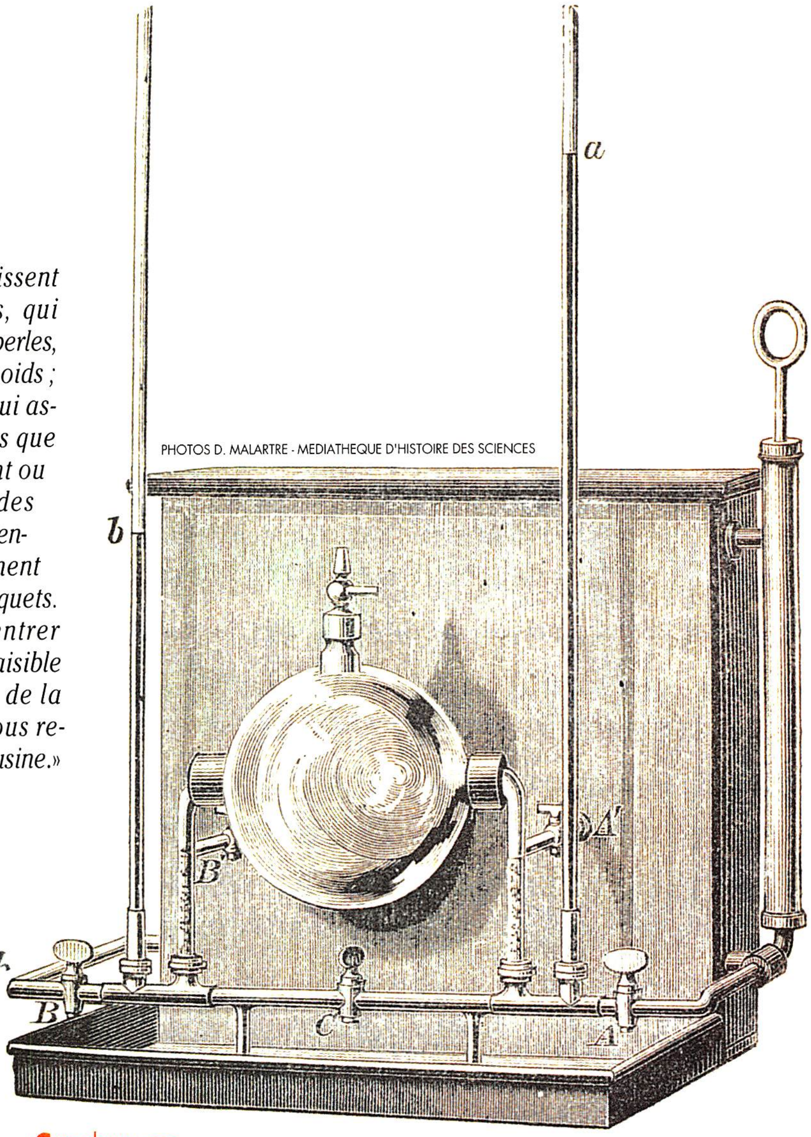




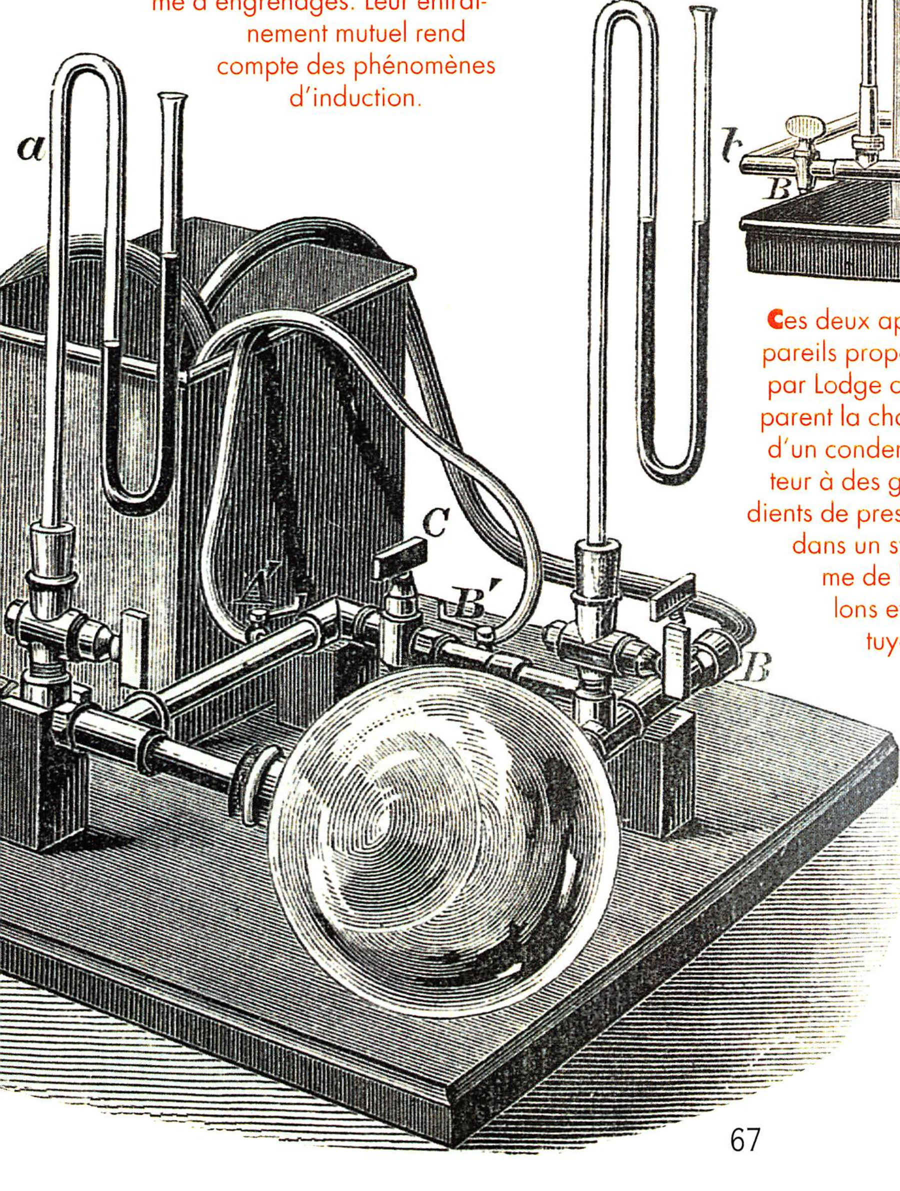
MEDIATHEQUE D'HISTOIRE DES SCIENCES

Autre analogie mécanique : le courant électrique dans un conducteur est comparé à une crémaillère, et le champ magnétique à un système d'engrenages. Leur entraînement mutuel rend compte des phénomènes d'induction.

*des poulies, qui glissent sur des tambours, qui s'enfilent dans des perles, qui soulèvent des poids ; et puis des tubes qui aspirent l'eau tandis que d'autres se dilatent ou se contractent ; des roues dentées qui s'entraînent mutuellement et poussent des cliquets. Nous pensions entrer dans la demeure paisible et bien ordonnée de la raison, et nous nous retrouvons dans une usine.»*




PHOTOS D. MALARTRE - MEDIATHEQUE D'HISTOIRE DES SCIENCES




Ces deux appareils proposés par Lodge comparent la charge d'un condensateur à des gradients de pression dans un système de ballons et de tuyaux.

Duhem avait raison, peut-être plus encore qu'il ne le croyait : les modèles mécaniques des physiciens britanniques reflétaient fidèlement l'esprit de l'époque victorienne. Les maxwelliens étaient de ceux qui poussèrent le plus loin les efforts du XIXe siècle pour « *faire de l'Univers une machine* ».

Les travaux de Heaviside, eux, plongeaient leurs racines dans une autre technologie : celle du télégraphe. En 1868 – époque où Heaviside y travaillait – l'industrie des câbles télégraphiques était en pleine expansion. Après s'être longtemps fait attendre, le câble de 1866 reliant l'Angleterre à l'Amérique fut immédiatement suivi par d'autres, vers l'Inde, vers l'Australie, et vers l'Extrême-Orient. Tous étaient fabriqués et posés par des entreprises britanniques, comme la plupart de ceux qui avaient été installés depuis le tout premier, celui de la Manche, posé en 1851. La télégraphie par câble était au

XIX[e] siècle une technique de pointe. L'avance prise par les Britanniques venait du fait que les scientifiques et les ingénieurs de ce pays étaient confrontés tous les jours à des problèmes – en particulier de retard et de distorsion du signal sur les liaisons longue distance – que leurs homologues français, allemands et américains rencontraient rarement. L'intérêt que les Anglais portaient aux phénomènes de propagation les rendaient plus réceptifs que leurs collègues étrangers aux théories qui s'appliquaient non seulement à ce qui se passait dans le câble, mais également dans l'espace situé autour.

## LES NOUVELLES ÉQUATIONS DE MAXWELL

Dans les années 1870, Heaviside s'empara de la théorie de Maxwell avec l'espoir de l'appliquer à ses problèmes de télégraphe. Il ne tarda pas à s'apercevoir que les équations du *Traité*, en particulier les équations de potentiels, convenaient mal à la tâche. Puis, en 1884, il souleva une question que Maxwell n'avait apparemment pas considérée : comment l'énergie du champ magnétique se déplace-t-elle lorsque les charges et les courants varient ? Partant des équations de Maxwell, Heaviside passa par des calculs fort compliqués et aboutit à un résultat étonnamment simple : le flux d'énergie en tout point du champ est simplement le produit des puissances des champs électriques et magnétiques en ce point, soit $S = E \times H$ (figure ci-contre). Un autre physicien nommé J. H. Poynting ayant produit le même résultat à la même époque, la formule du flux d'énergie a gardé son nom .

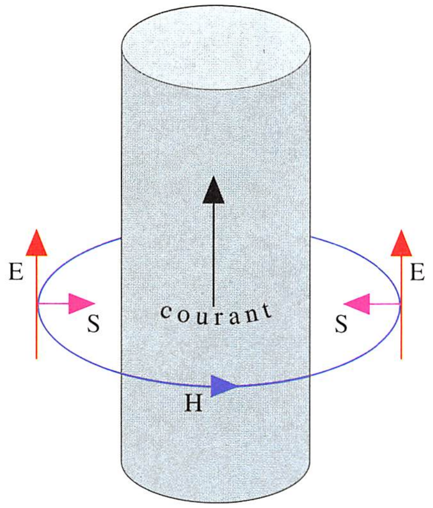
Heaviside estimait que la formule du flux d'énergie était la clé de voûte de la théorie électromagnétique. Une série convenable d'équations fondamentales devait pouvoir en rendre compte directement, sans passer par les détours qu'il avait été obligé d'emprunter. Il fit donc le travail dans l'autre sens, jusqu'à parvenir aux quatre équations de base comprenant seulement $E$ et $H$ celles que l'on dit aujourd'hui de Maxwell. Il les publia dans *L'électricien* au début de 1885. Mathématiquement équivalentes aux équations originales de Maxwell (celles du *Traité*), elles étaient débarrassées des encombrants "potentiels". Elles correspondaient ainsi mieux à ce que Heaviside considérait comme une description exacte de l'état physique réel du champ électromagnétique. Ces nouvelles équations étaient également mieux adaptées à la résolution des problèmes de télégraphe, et Heaviside les appliqua bientôt à l'analyse de la propagation des ondes le long des câbles télégraphiques.

A la fin des années 1880, plusieurs séries d'événements contribuèrent à mener l'histoire maxwellienne à son sommet. Il y eut d'abord les recherches de Heaviside sur le télégraphe : en 1887, il prédit que la distorsion des signaux pouvait être considérablement réduite en « *chargeant les lignes en auto-induction* ». On pouvait obtenir cet effet en intercalant, à intervalles réguliers, des bobinages dans les lignes. Cette idée, qui se révéla plus tard d'un grand intérêt commercial, déclencha un conflit entre Heaviside et W. H. Preece, le tout-puissant directeur des télégraphes aux Postes britanniques. Ce dernier avait affirmé que l'auto-induction était la cause et non le remède de la distorsion. Une mauvaise querelle s'ensuivit, où l'on vit Preece user de sa position pour bloquer toute publication de Heaviside dans *L'électricien* et ailleurs. Hors de lui, Heaviside traita Preece d'escroc et d'ignorant, puis tenta de contourner l'obstacle en s'adressant à un nouveau public, celui des physiciens.

Lodge fut le premier à le soutenir. Il se trouva donc lui aussi en conflit avec Preece en 1888. Une série d'expériences sur les décharges électriques brusques l'avait amené à réfuter les déclarations officielles de Preece sur la meilleure méthode de protection contre la foudre. Lodge se fit un plaisir de citer Heaviside à l'appui de ses thèses, et Heaviside fut très content du coup de projecteur que cette affaire jetait sur son œuvre théo-

ELECTRICAL PLANT, 1888

Du champ électrique au champ de bataille : Preece piétine Oliver Lodge au milieu d'un orage.




Les nouvelles équations portent sur la propagation de l'énergie dans les champs. Heaviside et Poynting établissent que le flux d'énergie associé à un courant est le produit des vecteurs de forces électrique (E) et magnétique (H). Le vecteur S est dirigé radialement par rapport au conducteur.

rique, qui était passée un peu inaperçue. Dans le courant de l'été 1888, Heaviside et Lodge échangèrent une correspondance abondante et resserrèrent les liens de leur complicité scientifique.

Les expériences les plus décisives de Lodge utilisaient la décharge d'un condensateur pour propulser des ondes électromagnétiques le long d'un fil. En traçant des modèles d'ondes stationnaires, Lodge parvint même à calculer leurs longueurs d'ondes. Tout cela se révéla en plein accord avec la théorie de Maxwell revue et corrigée par Heaviside et FitzGerald. Aussi, en juillet 1888, alors qu'il se préparait à prendre quelques vacances, Lodge ne doutait pas un instant que ses expériences allaient être le clou de la prochaine réunion, à Bath, de la British Association. Dans le train qui le menait à Liverpool, il eut le temps de lire un article. Un jeune physicien allemand, Heinrich Hertz, y décrivait la manière dont il avait détecté des ondes électromagnétiques se propageant dans l'air. Ces expériences cruciales allaient lui ravir la vedette au colloque de Bath. Elles représentaient, comme le déclara Lodge lui-même, une « *sorte d'apothéose pour la théorie de Maxwell* » et, avec elle, pour le programme des maxwelliens.

Hertz, en effet, s'était attelé en 1887 à la réalisation d'une expérience capable de trancher entre la théorie des champs et celle de l'action à distance. Cette expérience consistait selon lui à montrer que l'on pouvait produire et détecter des ondes électromagnétiques se déplaçant non dans un support solide mais dans l'espace, c'est-à-dire, comme le soutenait Maxwell, dans l'éther. Non sans surprise, il découvrit que des oscillations électriques haute fréquence produisaient à distance des étincelles dans des boucles conductrices convenablement disposées. Il venait en fait de découvrir le détecteur électromagnétique qui avait fait défaut à FitzGerald et Lodge quelques années plus tôt. Hertz fit de nombreuses expériences entre 1887 et 1888, dont certaines démontraient que ces "forces" électromagnétiques" se déplaçaient à vitesse finie, contredisant ainsi la généralisation de la théorie newtonienne de l'action à distance. Utilisant les murs de son laboratoire comme miroir, il montra que ces ondes électromagnétiques invisibles pouvaient être réfléchies, réfractées, diffractées et polarisées, tout comme des rayons lumineux. L'unité de la lumière et des phénomènes électromagnétiques ne pouvait plus faire de doute. Pourtant, Hertz aussi bien que d'autres physiciens allemands hésitaient à y voir une confirmation des idées de Maxwell.

Les maxwelliens britanniques, eux, ne balancèrent pas un instant. FitzGerald, qui présidait la réunion de Bath, profita de son discours d'ouverture pour rendre publics les "splendides résultats" de Hertz. Il proclama qu'ils apportaient la preuve tant attendue de la vérité de la théorie de Maxwell. Lodge, dont les expériences étaient un peu éclipsées, ravala sa déception et se joignit au chœur des louanges : les expériences de Hertz, dit-il, « *coupaient tout droit dans les blés mûrs de l'opinion scientifique insulaire* », et renforçaient considérablement la position des maxwelliens, notamment dans leur bataille contre Preece. Heaviside fit remarquer que « *l'influence très limitée du raisonnement théorique sur les esprits conservateurs* » était désormais *renforcée par le recours à l'évidence des faits* ». Ceux qui étaient restés insensibles aux élégances théoriques et conceptuelles de la théorie de Maxwell ne pouvaient que s'incliner devant l'accumulation des preuves expérimentales.

Hertz correspondit activement avec

En 1888, Heinrich Hertz signe le succès de Maxwell : les ondes électromagnétiques existent, ils les a détectées.

THE SCIENCE MUSEUM, LONDRES

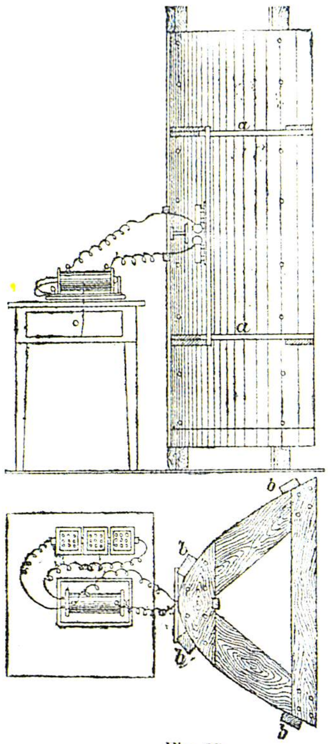
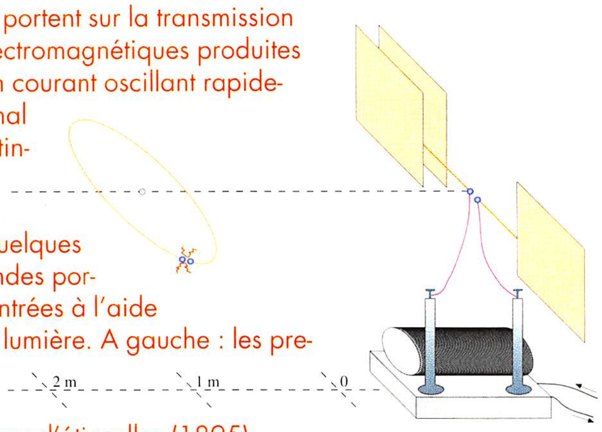
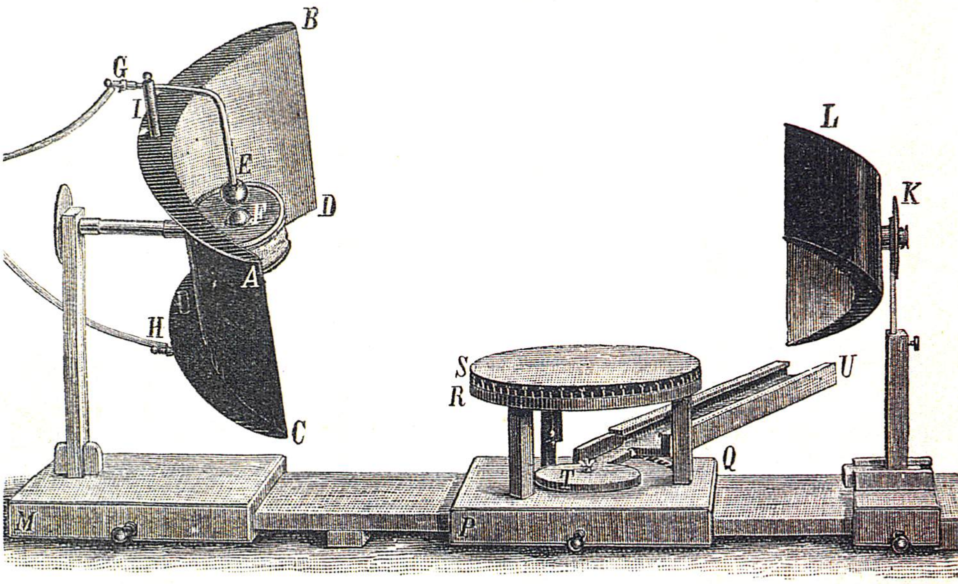



Fig. 35.

PHOTOS D. MALARTRE - MÉDIATHÈQUE D'HISTOIRE DES SCIENCES

Les expériences de Hertz portent sur la transmission dans l'espace d'ondes électromagnétiques produites par un circuit soumis à un courant oscillant rapidement. La réception du signal se traduit par une petite étincelle entre les deux bornes d'un circuit secondaire identique placé à quelques mètres de distance. Les ondes porteuses peuvent être concentrées à l'aide de miroirs, tout comme la lumière. A gauche : les premiers miroirs de Hertz. Ci-dessous : un autre modèle d'émetteur-récepteur d'étincelles (1895).



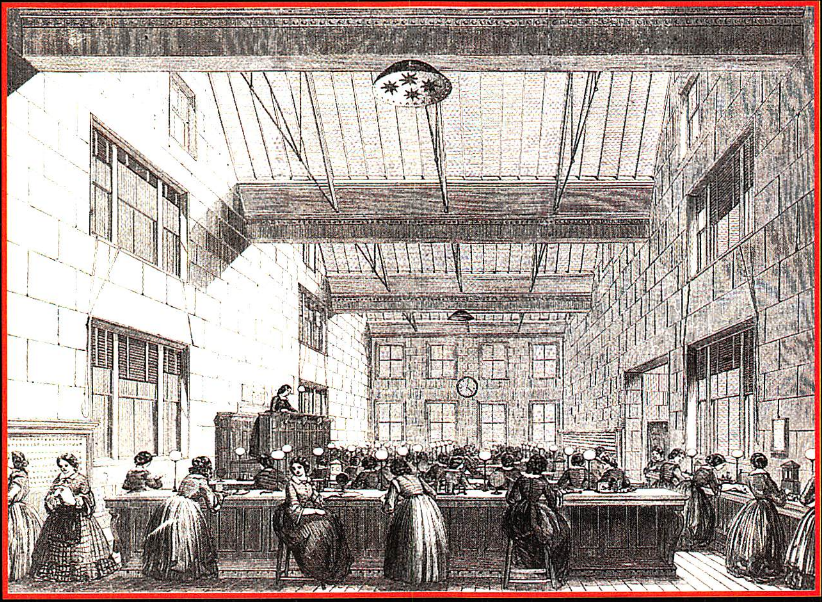




le groupe des maxwelliens à partir de 1888. Mais sa participation au groupe prit brusquement fin avec sa mort, en 1894. Il n'avait que 36 ans. Le gros œuvre du programme des maxwelliens était néanmoins achevé. Ils étaient parvenus à éclaircir et à confirmer la théorie du maître, et la version qu'ils en avaient donné – notamment les quatre “équations de Maxwell” de Heaviside – ne tarda pas à diffuser dans les manuels et dans la science dominante. L'évolution de la théorie de Maxwell ne s'arrêta pas là, bien sûr. La découverte de l'électron en 1897, puis l'arrivée, quelques dizaines d'années plus tard, de la relativité et de la mécanique quantique imposèrent quelques révisions importantes. Mais le cadre général de la théorie est resté remarquablement stable depuis son établissement, il y a un siècle, par les maxwelliens.

Un jour de 1895, Heaviside fit néanmoins à FitzGerald une remarque un peu intrigante. « *Maxwell*, lui dit-il, *n'était qu'à moitié maxwellien* ». Il voulait dire par là que Maxwell n'aurait sans doute pas reconnu comme les siens certains aspects de la théorie, élaborés dans les années 1880 et au début de 1890. Malgré tout, il est clair que Heaviside ne doutait pas de la permanence des idées de Maxwell au cœur de la synthèse qu'il venait de réaliser. Pour preuve, on citera une réflexion qu'il coucha dans un de ses manuscrits restés non publiés. Méditant sur ce qu'il appelait la « *vraie immortalité de l'âme* », c'est-à-dire l'effet durable que chacun de nous peut exercer sur le monde au-delà de sa mort, Heaviside remarquait' que certaines “âmes” se distinguaient des autres : «*Celle d'un Shakespeare ou celle d'un Newton sont prodigieuses. De tels hommes connaissent la meilleure partie de leur vie après avoir rejeté leur enveloppe mortelle et avoir connu la tombe. Maxwell était l'un de ceux-là. Son âme vivra et grandira encore dans les temps à venir et, dans des milliers d'années, brillera parmi les astres anciens, dont la lumière met des siècles à nous parvenir, et au milieu de tous les autres sa lueur ne sera pas des moindres.* »

Maxwell est sans aucun doute l'une des plus brillantes étoiles du firmament scientifique ; mais un œil averti peut aussi apercevoir autour de lui la petite constellation des maxwelliens, dont la lumière s'ajoute aujourd'hui à la sienne. ■

# Et Après



Les plus célèbres reliques de Maxwell sont au nombre de cinq : quatre équations et un démon. Des premières, le XX$^{e}$ siècle s'est emparé pour dater et illustrer ses révolutions, scientifiques, techniques et politiques. Du démon, on peut dire qu'il appartient à une histoire inachevée : celle des limites du savoir humain, au-delà desquelles un homme comme Maxwell ne pouvait voir que le domaine de Dieu.

MARY EVANS P.L.

# Un Démon Pour Sauver Dieu

Un astronome belge fonde une physique sociale. En Angleterre, un célèbre historien l'affirme : dans le monde moral, tout serait ordre, symétrie et loi. Les sciences sociales et physiques nieraient l'existence de Dieu. Preuves à l'appui : les théories de Darwin et la thermodynamique, récemment développée par Maxwell. L'utilisation, dogmatique et violemment positiviste, de ses théories lui est insupportable. Comment sortir de l'impasse ? En donnant naissance à un démon...

Par Gérard Chevalier

Edimbourg. Juin 1850. James Clerk Maxwell vient d'avoir 19 ans. En instance de départ pour Cambridge, il écrit à Lewis Campbell qui, un an plus tôt, l'a précédé dans l'exil vers les universités anglaises. Un article, paru dans la revue savante locale, *the Edimburg review,* a attiré son attention : son ami Campbell connaît-il les thèses qui y sont exposées ? L'article en question est signé John Herschel. Le célèbre astronome anglais y fait une longue présentation des travaux d'un de ses collègues, le Belge Adolphe Quetelet.

A l'occasion de cette lecture, le jeune étudiant découvre une discipline qui, en plein essor, irrigue le champ des sciences sociales. Une discipline dont, quelques années plus tard, le professeur Maxwell fera une bien curieuse utilisation [(1)]...

L'article de l'*Edimburg review* fait peu mention d'astronomie. Quetelet a en effet délaissé l'observation des étoiles pour tourner son regard vers les communautés humaines. Son grand projet est la création d'une "physique sociale" : faire émerger de l'apparent chaos des comportements sociaux des "lois" de régularité. Il ambitionne d'égaler les réussites de son domaine d'origine, l'astronomie : accumulation de données par Tycho Brahé, identification de lois par Kepler, suivies du couronnement par le grand œuvre des *Principia*...

A travers l'Europe, de nombreux organismes officiels sont déjà à l'œuvre ; à l'image du travail de Brahé, des données s'accumulent. On y dresse des tables numériques sur la mortalité, les crimes, les naissances, etc. Quelques lois "à la Kepler" ont déjà fait la une des gazettes. L'analyse des registres d'état civil a montré par exemple une étonnante régularité du rapport entre les naissances de garçons et de filles : 26/25... En Grande-Bretagne, les spécialistes de ces travaux se sont dotés d'un nom, dérivé d'une terminologie germanique, les *statists,* révélant leur quête de lois stables. Leur – haute – ambition s'affiche dans une déclaration du Conseil de la Société statistique de Londres, datée de 1840 : « *La statistique, comme son nom le suggère, se définit par les observations qui sont nécessaires aux sciences sociales ou morales, aux sciences du* statiste, *à qui le gouvernement et le législateur doivent faire appel pour les principes menant leur action de légiférer et gouverner.* »

Sur le Continent, Adolphe Quetelet ne craint pas pour sa part d'affirmer en 1848 que, « *contrairement à l'opinion généralement admise, les faits sociaux, sous l'influence du libre arbitre, se déroulent avec une plus grande régularité que les faits simplement sujets à des causes physiques* ». Belle assurance ! Et pourtant, cette même année 1848 est le cadre d'importantes turbulences révolutionnaires... Quetelet n'y décèle cependant que des perturbations, elles n'érodent nullement sa confiance : « *Ces fléaux frappent la structure, à la fois physique et morale, de l'humanité et, en dépit de leurs effets destructeurs, il est au moins consolant de penser qu'ils ne peuvent en aucune manière modifier les lois éternelles qui nous guident. Leur action est transitoire, et le temps aura bientôt soigné les blessures du corps social, même si ce n'est pas pareil pour les individus* .»

Où les mots révèlent l'éducation de Quetelet : l'expression "corps social" surgit sous sa plume. Et puisque les corps célestes sont dotés d'un centre de gravité, Quetelet rêve de découvrir

1 – Les informations qui alimentent ce récit sont en majorité tirées d'un article de T.M. Porter : *"A Statistical Survey of Gases : Maxwell's Social Physics"*, paru en 1981 dans *Historical studies in the physical sciences.*

MAGNUM – E. LESSING - IRAQ MUSEUM

Les démons de la mythologie grecque constituent une classe intermédiaire entre les dieux et les hommes. Bienfaisants ou malfaisants, ils interviennent occasionnellement dans les affaires humaines.

celui des corps sociaux : l'*homme moyen*... Pour atteindre son but, il tire de sa pratique d'astronome l'un des outils couramment utilisés par ses pairs : la loi des erreurs. On sait qu'avec tout appareil de mesures, les observations ne sont jamais exactes. Avec un télescope par exemple, elles sont perturbées par les mouvements de l'atmosphère, la dilatation des instruments sous l'effet de la température, l'œil de l'astronome, etc. : autant de sources d'erreurs de mesure. Que se passe-t-il quand on répète l'observation d'un même astre un grand nombre de fois ? On constate généralement que **les mesures se distribuent suivant une courbe régulière, autour d'une valeur moyenne**. Sous l'hypothèse que les nombreuses causes d'erreur sont indépendantes et qu'elles sont de même amplitude, Laplace avait donné l'expression mathématique de la courbe d'erreurs idéale (en "exp ($-x^2$)", qui se traduit graphiquement par une courbe en forme de cloche).

En reprenant cette loi à son compte, Quetelet ne se limite pas à un simple transfert d'une technique astronomique vers les sciences sociales. Il élargit le champ d'application de cette loi qui, à l'origine, exprime une **incertitude** dans l'observation des faits. Quel que soit le résultat de la mesure, à un instant donné, les astronomes savent en effet que l'astre observé doit occuper une position et une seule. Quetelet soupçonne qu'une telle loi mathématique ne s'applique pas seulement à des imperfections de mesures. Fervent lecteur de Fourier qui, outre son travail scientifique, avait un temps occupé la fonction de directeur du Bureau des statistiques du département de la Seine, Quetelet s'approprie cette phrase de l'auteur de la théorie analytique de la chaleur : « *L'analyse mathématique unifie les effets les plus divers et révèle leurs propriétés communes. (...) A l'œuvre dans toute la nature, elle est un élément préexistant de l'ordre universel.* »

La loi des erreurs installe effectivement de l'ordre dans le désordre des mesures d'**un même** objet. Aurait-elle quelque chose à révéler du comportement de **plusieurs** objets, semblables sans être tout à fait les mêmes ? Les torses de 5 738 soldats écossais permettent à Quetelet de répondre à cette question par l'affirmative.

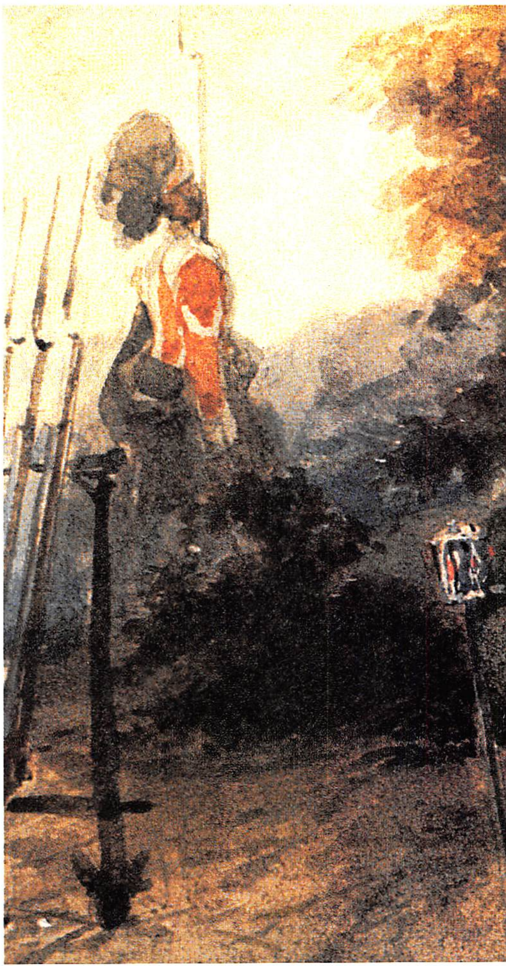
Adolphe Quetelet (1796-1874), astronome de formation, développe les statistiques sociales.

L'armée de la patrie de Maxwell a en effet scrupuleusement enregistré les tours de poitrine de ses soldats : au bout de fastidieux calculs, Quetelet montre que ces mesures se distribuent sur une courbe dont l'allure est très proche de celle d'une courbe d'erreurs. Au "centre de gravité" de la courbe, apparaît, magnifique, la valeur du torse du soldat écossais modèle... Tout se passe donc comme si les torses réels n'étaient en fait que des "erreurs de copie" de ce torse idéal. La loi des erreurs, "si simple et si élégante" selon les termes de Quetelet, est donc bien à l'œuvre dans la nature : elle révèle une régularité là où la plus grande diversité semble régner.

Dans l'article de l'*Edimburg review*, John Herschel insiste sur la généralisation de cette loi : les sciences physiques, autant que les sciences sociales, recèlent certainement des phénomènes qui doivent lui "obéir". Il fait également une démonstration, par la méthode dite des "moindres carrés", de l'application de la loi des erreurs à des événements intéressant les compagnies d'assurance. Son jeune lecteur écossais s'en souviendra...

Maxwell songe probablement à tirer profit de cette approche statistique à l'occasion d'un travail qui l'occupe à partir de 1855 : les anneaux de Saturne. On pouvait en effet aborder le problème sous l'angle des "grands nombres", si l'on considérait ces anneaux comme formés d'une myriade de corps entrant en collision les uns avec les autres. Toutefois, à l'époque, l'entreprise lui paraît trop ardue...

Quelques années plus tard, en 1857, un historien anglais, Henry Thomas Buckle, connaît un gros succès de librai-



rie avec le premier tome de son *Histoire de la civilisation en Angleterre.* Maxwell, alors professeur au King's College de Londres, fait partie de ses nombreux lecteurs. Buckle est un disciple de Quetelet et pousse les feux des sciences sociales encore plus loin que son maître. La société, écrit-il, est régie par des lois invariantes, incompatibles non seulement avec l'autorité politique, mais aussi avec la toute-puissance divine et le libre arbitre : « *Dans le monde moral, de même que dans le monde physique, il n'existe pas d'anomalie, rien n'est étrange. Tout est ordre, symétrie et loi.* » Certes, les meurtres ou les suicides apparaissent, au niveau individuel, comme des actes incohérents. Mais, argumente Buckle, dès qu'ils sont étudiés en masse, tous ces phénomènes sociaux observent des lois de la plus grande régularité imaginable.

Affirmer l'incompatibilité de ces lois sociales avec la puissance divine heurte de plein fouet les convictions religieuses de Maxwell. Mais l'idée de régularité du comportement des *populations* (d'hommes ou d'objets) creuse son sillon ...

1859. Voici trois ans que Maxwell a publié son premier article sur l'électromagnétisme, *On Faraday's Lines of Force*. Son travail sur ce sujet se trouve-t-il alors dans une impasse ? Maxwell cherche-t-il une distraction intellectuelle ? Toujours est-il que la lecture d'un résumé d'un article de Clausius, paru dans le *Philosophical Magazine* , lui donne l'occasion d'exercer ses talents dans un tout autre domaine : la théorie dynamique (2) des gaz.

Pour expliquer le comportement d'un gaz, l'hypothèse moléculaire avait été avancée depuis longtemps. Mais tout le travail restait à accomplir : modéliser les molécules, imaginer leur mouvement, leurs échanges d'énergie, etc. Ainsi, la pression d'un gaz pouvait s'interpréter comme l'expression du choc, sur les parois du récipient, de molécules s'agitant en tout sens. En Allemagne, Krönig avait remarqué que, puisque les parois de la plus lisse des enceintes sont rugueuses en comparaison de la taille des atomes, « *le parcours de chaque atome de gaz doit être si irrégulier qu'il défie tout calcul. Cependant, en accord avec les lois de la probabilité, on peut supposer, à la place d'une irrégularité absolue, une complète régularité* ». Dans un premier article en 1857, son collègue Rudolf Clausius réussit à dériver une formule, à partir d'un système de *n* molécules identiques, en mouvement : cette formule relie la pression et le volume du gaz à la masse unitaire et à la vitesse moyenne des molécules. Si cette formule est vraie, les données expérimentales sur les valeurs macroscopiques (pression, volume...) impliquent que la vitesse moyenne des molécules (donnée microscopique, évidemment inaccessible) doit atteindre plusieurs centaines de mètres par seconde. Un météorologiste hollandais, Buys Ballot, ne peut admettre cette incroyable vélocité. Il tient une preuve simple : ouvrez la porte d'une pièce dans laquelle règne une mauvaise odeur. Si les molécules du gaz malodorant se déplaçaient aussi vite que Clausius l'indique, l'odeur disparaîtrait très rapidement. Or, chacun a déjà constaté qu'il n'en est rien...

C'est la réponse à cette objection que Maxwell lit dans le *Philosophical Magazine*. Clausius explique qu'il faut considérer que les molécules, de diamètre fini, s'entrechoquent sans cesse et rebondissent dans toutes les directions. Il introduit la notion de "parcours libre moyen" d'une molécule, c'est-à-dire de la distance moyenne parcourue sans

**L**'armée écossaise a enregistré les tours de poitrine de 5 738 soldats. Surprise ! Les mesures se distribuent selon une courbe régulière : Quetelet a identifié une loi de la nature.

2 – L'adjectif dynamique indique qu'on considère les gaz comme formés d'objets microscopiques obéissant aux lois fondamentales de la dynamique.

J.L. CHARMET

Formé à Polytechnique, Sadi Carnot énonce un théorème qui, avec Clausius, deviendra le second principe de la thermodynamique.

entrer en collision avec d'autres molécules. Pour le calculer, il commence par un cas simple : celui d'une seule molécule en mouvement dans un ensemble de molécules fixes. Puis, sans véritable justification, il pose qu'une multiplication par une constante 3/4 suffit pour généraliser ce cas simple à celui de molécules, **toutes animées d'une même vitesse**. Clausius aboutit ainsi à un ordre de grandeur très faible pour ce parcours libre moyen. Conclusion : chaque molécule se déplace très vite, mais elle ne le fait pas longtemps dans la même direction. L'objection de Buys Ballot était habilement contrée.

Maxwell n'est pas très satisfait du traitement de Clausius. Il lui semble de plus que cette théorie cinétique [3] des gaz entraîne des conséquences inexactes. A titre d'exercice, comme il l'écrit dans une lettre à Stokes, fin mai 1859, Maxwell reprend la théorie à la base, dans le secret espoir d'en montrer l'incohérence, rien que par le calcul...

Il commence par le plus élémentaire : poser les lois de la collision élastique entre deux particules, vues comme deux minuscules boules de billard. Il lui faut ensuite se donner une loi qui s'applique à l'énorme nombre de molécules, qui régisse la façon dont leurs vitesses sont distribuées. Clausius avait fait l'hypothèse la plus simple, celle d'une vitesse égale pour toutes les particules d'un même gaz. Mais lui-même reconnaissait que la réalité ne devait pas être aussi simple...

C'est ici que Maxwell fait intervenir ses lectures de Quetelet, Buckle et Herschel et se souvient de leur interprétation de la loi des erreurs. Et si les vitesses des molécules se comportaient comme les torses des soldats écossais ? La question est légitime puisque, comme les *statistes* des sciences sociales, Maxwell fait face à un grand nombre d'objets, ici les molécules en mouvement, qu'il est incapable de traiter individuellement. La loi "simple et élégante" de Laplace et Quetelet, doit s'appliquer.

Cette prise de conscience change radicalement l'opinion de Maxwell vis-à-vis de la théorie cinétique des gaz. Car tout s'enchaîne "élégamment" [4]... Les souvenirs – ou les archives – de Maxwell sont précis : sa démonstration de la mise en œuvre de la loi des erreurs est complètement calquée sur celle qu'Herschel, neuf ans plus tôt, avait déroulée sur les problèmes des compagnies d'assurance. Maxwell parvient ainsi à dériver un impressionnant ensemble de conséquences, modélisant le comportement des gaz, connu par ses lois macroscopiques. L'une d'entre elles est particulièrement intéressante : elle modifie le coefficient 3/4 introduit par Clausius. Maxwell le remplace par une valeur, cette fois-ci théoriquement justifiée : $1/\sqrt{2}$. Mais $1/\sqrt{2}$ est trop proche de 3/4 (6% seulement de différence) pour qu'une expérience puisse trancher et valider sa théorie...

Tous ces développements font la matière d'un article, publié par Maxwell en 1860. A sa lecture, Clausius entame un dialogue avec le professeur écossais. Il tente de lui expliquer sa propre dérivation du coefficient 3/4, mais ses arguments montrent qu'il n'a pas identifié la pierre d'angle de la théorie de Maxwell : la loi de distribution des vitesses. Il ne sera pas le seul... Jusqu'en 1867, date de la publication du second article de Maxwell sur le sujet, cette idée ne fait l'objet d'aucun écho, ni d'aucune critique dans la littérature scientifique. En fait, si Maxwell remet l'ouvrage sur le métier sept ans plus tard, c'est qu'il a lui-même ressenti le besoin de justifier avec davantage de rigueur la nécessité, à l'équilibre, de cette loi de distribution des vitesses.

Quoi qu'il en soit, le travail accompli par Maxwell sur la théorie cinétique des gaz durant ces années 1860-1867 s'inscrit dans la droite ligne d'un déterminisme, tel qu'il était poursuivi par Quetelet [5]. Pendant cette période, la notion importante de sa démarche réside dans une recherche, par la statistique, de lois régulières, de **certitude**.

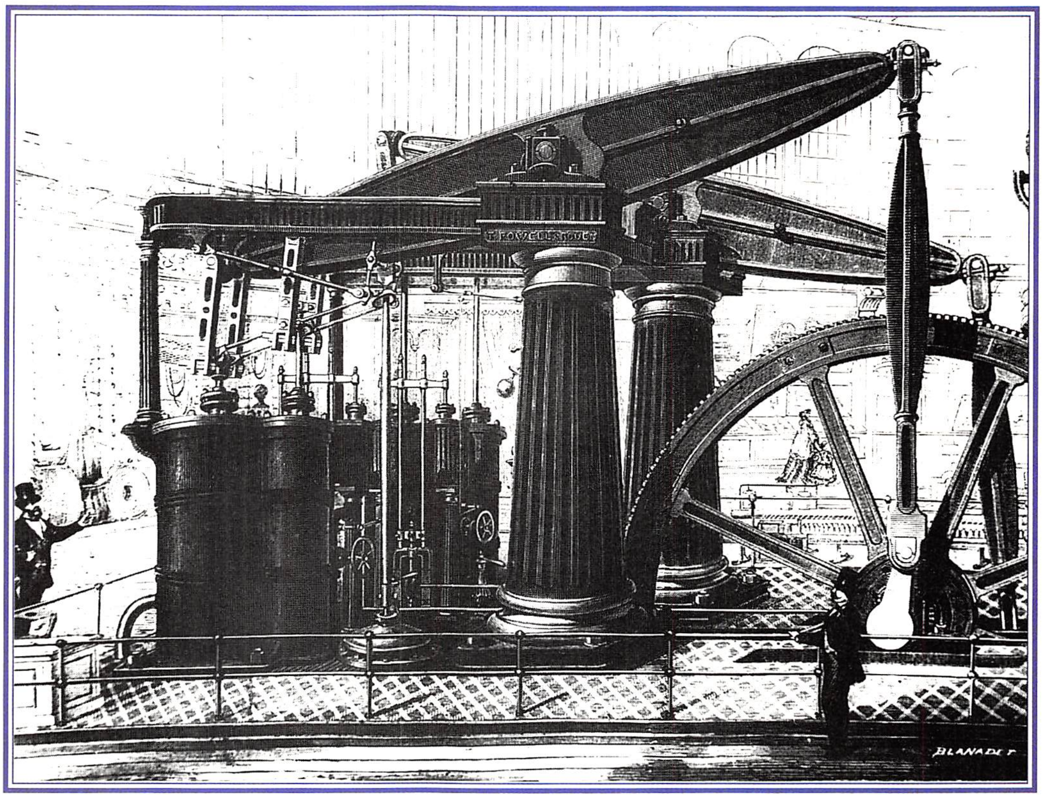
Au cours de la décennie suivante, tel le docteur Frankenstein du populaire roman de Mary Shelley (paru en 1818), Maxwell sent sa créature lui échapper. Elle s'engage sur des chemins fort déplaisants et s'acoquine avec des personnages détestables : John Tyndall et Thomas Henry Huxley, par exemple. Tous deux défendent avec brio un discours positiviste, violemment antireligieux. Ils se rangent notamment parmi

3 – L'adjectif cinétique vient souligner que cette théorie des gaz prend pour point de départ les mouvements des molécules.

4 – Pour être tout à fait exact, Maxwell pose deux hypothèses supplémentaires : les trois composantes des vitesses suivent des lois indépendantes, et la loi de distribution ne dépend que du module de la vitesse, et non pas de sa direction.

5 – L'intérêt de Maxwell pour la théorie des gaz s'inscrit aussi dans une époque singulièrement marquée par l'utilisation des gaz : l'âge d'or des machines à vapeur...

les avocats de Darwin qui, en 1859, avec la publication de *L'origine des espèces*, a ouvert un vigoureux débat dans les cercles conservateurs de Grande-Bretagne. Or, Maxwell ne peut ignorer l'une des originalités de Darwin. Pour rendre compte de l'évolution animale, l'interprétation pertinente des transformations doit s'effectuer, non pas sur des individus, mais sur des **populations** suffisamment nombreuses : des espèces.



RXPLORER ARCHIVES

Maxwell travaille sur les gaz alors que les machines à vapeur sont en plein essor (celle-ci est médaille d'or de l'exposition de Paris en 1867.)

Dans leur combat anticlérical, Tyndall et ses collègues, tous des exclus de l'*intelligentsia* de Cambridge et d'Oxford, font également appel à des domaines que Maxwell connaît parfaitement : la thermodynamique et ses deux principes. Selon eux, la validité de ces théories scientifiques apporte la preuve irréfutable que Dieu n'a rien à faire dans notre monde. Or, Maxwell lui-même a écrit : « *Si nous connaissons ce qu'il y a en tout point de l'espace à un instant donné, nous pouvons dire que nous connaissons tous les événements de la Nature. On ne peut rien concevoir d'autre qu'il soit nécessaire de connaître.* »

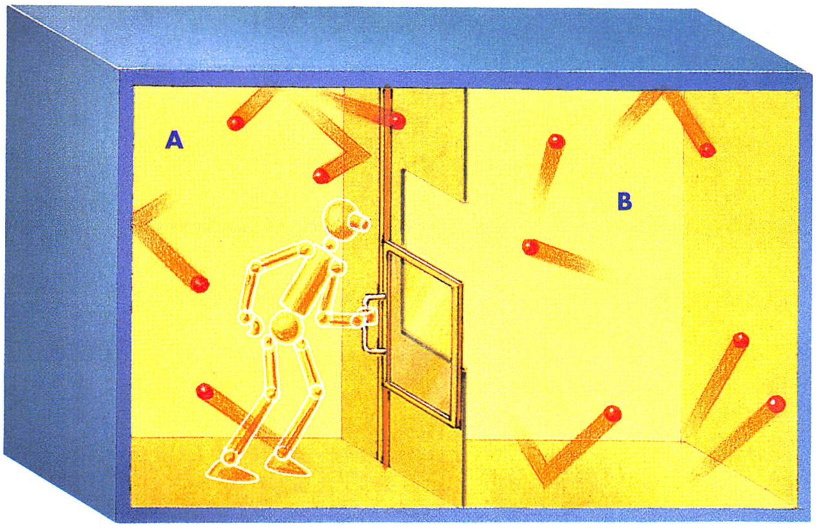
Ce voisinage est évidemment insupportable. Comment concilier sa foi en la vertu des théories physiques, si déterministes, et sa foi chrétienne, qui implique que l'homme puisse exercer sa liberté, don de Dieu ?

Dès 1862, Maxwell avait esquissé une première tentative. Dans une lettre à Campbell à propos du travail de Helmholtz sur la conservation de l'énergie, il avait écrit : « *L'âme n'est pas la force motrice directe agissant sur le corps. Si tel était le cas, son action durerait jusqu'à ce qu'elle ait accompli une certaine quantité de travail, comme le ressort d'une montre finit par s'arrêter. L'âme n'est pas le seul moteur. C'est la nourriture qui est le moteur, et elle disparaît après son utilisation, contrairement à l'âme. Certes, l'âme et le corps interagissent, mais il n'y a pas transfert d'énergie de l'un à l'autre, – comme lorsqu'on appuie sur la gâchette d'un fusil, c'est la poudre qui est responsable de l'éjection de la balle…* »

En décembre 1867, une requête de son ami P. G. Tait lui fournit l'occasion de "tirer une balle mortelle" sur le déterminisme que les pourfendeurs de la religion avaient cru lire dans la thermodynamique. Tait s'apprête alors à publier un ouvrage sur le sujet. Il tente d'écrire l'histoire des derniers développements de la discipline, avouant avoir adopté « *un point de vue peut-être trop britannique* »… Quoi qu'il en soit, il a l'ambition de rendre accessible aux étudiants les concepts de cette science. Il demande donc à Maxwell de relire son manuscrit. Dans sa réponse, celui-ci se refuse à entrer dans le débat d'antériorité des découvertes : « *Ma contribution personnelle à cette étude ne peut se limiter qu'à modifier tel ou tel point de vue, à des fins de clarté ou de diversité, voire, ici ou là, à identifier quelques trous dans les raisonnements pour en rétablir la puissance et la stabilité.* » Maxwell feint-il l'humilité ? En tout cas, le trou qu'il s'apprête à percer dans la thermodynamique triomphante d'alors ne se rebouchera pas de sitôt…

Le second principe de la thermodynamique est au centre de la cible de Maxwell. On sait que son élaboration est l'œuvre de Carnot, prolongée par Clausius : « *La chaleur ne peut jamais passer d'un corps froid à un corps chaud, sans qu'il ne se produise en même temps une quelconque autre modification* » (c'est-à-dire sans qu'on fournisse un travail). L'universalité de l'énoncé de ce principe se matérialise ici dans l'adjectif **jamais**. Maxwell y voit un point faible, et se fait fort de présenter une situation – et une seule suffit pour abolir la généralité – qui viole le second principe. Il puise donc dans son imagination un dispositif qui, comme on pouvait s'y attendre, met en scène des molécules de gaz…

Considérez deux enceintes, A et B, séparées par une cloison, écrit-il. Supposez que la température du gaz de l'enceinte A soit supérieure à celle du gaz de l'enceinte B. Maxwell interprète la température d'un point de vue moléculaire : une température plus élevée signifie que les molécules du gaz A ont, en moyenne, une énergie cinétique plus élevée que celles de B. Mais, comme Maxwell l'a montré, les vitesses indivi-




DESSIN CLAUDE LACROIX

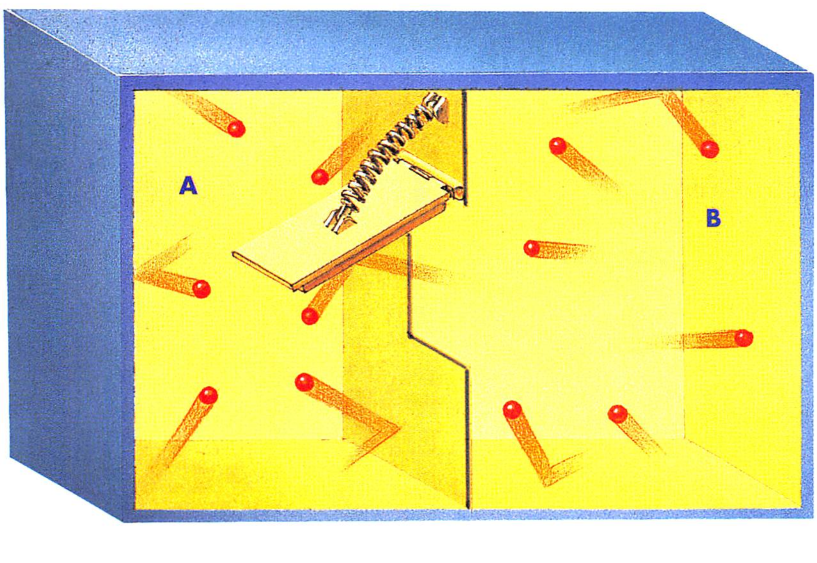
**L**e petit être intelligent de Maxwell observe les molécules s'agitant dans les enceintes A (chaude) et B (froide). Sa connaissance de leurs vitesses individuelles lui permet d'ouvrir et fermer la porte coulissante à sa guise. Par son action de tri des molécules, accomplie sans effectuer de travail, l'enceinte chaude se réchauffe, l'enceinte froide se refroidit. L'universalité du second principe de la thermodynamique est mise à mal par ce simple argument...

duelles des molécules se distribuent, autour de cette valeur moyenne, selon la désormais célèbre "loi des erreurs". Dans chaque enceinte, on peut donc trouver des molécules de vitesses très diverses. Maxwell perce un trou dans la cloison (le trou du second principe !), et le dote d'une porte coulissante, de masse négligeable : « *Maintenant, imaginez un petit être qui, par simple observation, connaisse la position et la vitesse de toutes les molécules. Ce petit être ne fait aucun travail, sauf de soulever et d'abaisser la porte.* » Ce petit être reçoit la mission d'ouvrir la porte dès qu'il voit s'approcher une molécule de A, dont la vitesse est inférieure à la vitesse moyenne des molécules de B. A l'inverse, il autorise le passage d'une molécule de B vers A, quand sa vitesse est supérieure à la vitesse moyenne des molécules de A. Enfin, ce petit être doit faire en sorte de respecter l'équilibre : ne pas faire passer plus de molécules dans un sens que dans l'autre. En finale, « *l'énergie de l'enceinte A a augmenté, celle de B diminué ; ou encore, l'enceinte chaude est devenue plus chaude, et l'enceinte froide plus froide, sans qu'aucun travail n'ait été accompli. Seule, l'intelligence d'un petit être clairvoyant et observateur a été nécessaire.* » La démonstration est limpide : en manipulant les molécules individuellement, le second principe est violé. « *Mais cela n'est pas réalisable*, ajoute Maxwell, ***parce que nous ne sommes pas assez intelligents.*** »

P. G. Tait montre cette lettre à William Thomson, qui note dans la marge : « *Très bien. Une autre méthode consisterait à inverser le mouvement de toutes les particules de l'Univers...* » Effectivement, puisque toutes ces molécules obéissent aux lois fondamentales de la dynamique, l'inversion simultanée, par un démon supérieurement intelligent et efficace, du sens de leurs vitesses aboutirait à rendre réversible ce que le second principe énonce comme irréversible...

**T**homson baptise ce petit être intelligent d'un nom aux résonances aujourd'hui ambiguës: le "démon" de Maxwell. Toutefois, à l'époque, Thomson n'y associe aucune intention diabolique. Son univers est plutôt celui de la mythologie grecque : les *daimones* y constituent une classe intermédiaire entre les dieux et les hommes. Disposant de puissances mystérieuses, bienfaisantes ou malfaisantes selon les cas, ils interviennent occasionnellement dans les affaires humaines. Dans les versions tardives des récits grecs, ils deviennent des gardiens de mortels, sortes de protecteurs : des démons personnels...

Rarement, une telle métaphore aura aussi bien fonctionné. Car ce démon est multiple : habile trieur de molécules, il désarçonne aussi les Tyndall et consorts. Enfin, en s'immiscant dans la controverse, il protège Maxwell face à d'éventuelles critiques venues du camp de la religion. Le coup est magistral, le retournement spectaculaire. Et le démon ouvre la porte sur un nouveau paysage de la physique...




**L**a version mécanique du démon de Maxwell : von Smoluchowski imagine un clapet moléculaire, à la place de la porte coulissante de Maxwell. Ici, les enceintes A et B sont à pressions égales. Le ressort est réglé pour s'ouvrir sous le choc d'une molécule de B, laisser passer cette molécule et se refermer immédiatement. Intuitivement, tout laisse à penser que, petit à petit, une différence de pression apparaîtra. La fine analyse de von Smoluchowski montre que le clapet, lui-même formé de molécules, s'échauffe lors des collisions répétées. Il finit par s'ouvrir et se fermer de manière aléatoire : les molécules circulent dans les deux sens et nulle différence de pression n'est créée. Face à un démon mécanique, le second principe tient debout...

Car, comme Maxwell le précise peu après, « *le principal objectif de ce démon est de montrer que le second principe de la thermodynamique ne repose que sur une certitude statistique.* » En somme, ce n'est qu'une loi macroscopique qui exprime notre **incertitude** à propos des phénomènes microscopiques. Nous ne savons rien, par exemple, de la réalité des échanges d'énergie au niveau des molécules. Maxwell fait ainsi ressortir une conséquence logique de la théorie dynamique des gaz, fondée sur sa loi de distribution des vitesses. A l'équilibre, **un système gazeux formé d'un nombre énorme de molécules est nécessairement soumis à des fluctuations spontanées**, y compris celles qui, au niveau microscopique, prennent de la chaleur à un corps froid pour la donner à un corps chaud. Le second principe de la thermodynamique voit son champ d'application singulièrement limité. Dans son emportement, Maxwell va même jusqu'à déclarer « *qu'on peut accorder au second principe le même degré de vérité que la proposition suivante : jetez l'eau d'un seau dans l'océan, vous ne pourrez jamais, avec le même seau, récupérer la même eau !* »

Pour Maxwell, la démonstration de l'efficacité de son démon suffit à réduire le déterminisme philosophique, niant l'existence du libre arbitre, à une simple conjecture. Son ami Fleeming Jenkin abonde dans son sens. Selon lui, l'argument fonctionne également pour un cerveau humain, vu comme un assemblage atomiste : un "démon" est capable d'y orienter invisiblement, c'est-à-dire sans consommation d'énergie, le parcours des molécules. Dans un tel système instable, doué d'une énergie interne, une petite action peut engendrer des comportements globaux très divers. Certes, en tant qu'objet physique, le cerveau humain ne "désobéit" pas aux lois fondamentales de la **dynamique**. Mais ce n'est pas une machine thermodynamique, obéissant au second principe. Son fonctionnement n'est pas analogue à celui des locomotives à vapeur circulant, à des horaires précis, sur des lignes de chemin de fer parfaitement dessinées. Quoique le parcours d'une puissante locomotive puisse toujours être modifié par l'action, énergétiquement négligeable, d'un aiguilleur étourdi (autre métaphore du démon, utilisée par Maxwell lui-même, avec celle de la gâchette d'une arme à feu)...

En 1875, lors d'une assemblée d'anciens élèves de Cambridge, Maxwell résume ses convictions quant aux limitations de la connaissance statistique des phénomènes. Sa conférence s'intitule : *La science et le libre arbitre*. **Seules les explications dynamiques sont totalement déterministes**, explique-t-il, et **si les méthodes statistiques sont fiables, elles sont imparfaites**. Dans la controverse, son propos n'est pas d'apporter, par la science, une preuve de l'existence du libre arbitre, mais simplement de montrer que l'exercice d'une liberté est compatible avec l'ensemble des connaissances scientifiques du moment.

La dynamique, essentiellement déterministe, impose une vision du temps réversible, où passé et futur sont équivalents : l'argument de Thomson inversant les vitesses des molécules de tout l'Univers est, à cet égard, pertinent. En revanche, la thermodynamique, avec son second principe, est porteuse d'irréversibilité : la chaleur s'écoule du chaud vers le froid, elle ne prend jamais le chemin inverse, le futur se distingue nettement du passé. Située au croisement de ces deux théories, la dynamique des gaz ne pouvait donc manquer de faire surgir la contradiction : la vision scientifique du monde était soumise à un cruel écartèlement...

Dans sa conférence de Cambridge, Maxwell conclut par un appel aux générations futures (reconnaissons que le style, un peu daté, de son écriture n'en facilite pas la lecture) : « *Si donc, ces partisans des sciences physiques, desquels le public cultivé tire sa conception du physicien et dont le style porte la marque du timbre scientifique des doctrines qu'ils promulguent, sont conduits dans les arcanes de la science* ***à étudier les singularités et les instabilités, plutôt que les continuités et les stabilités des choses,*** *alors la promotion de la connaissance de la nature peut tendre à effacer ce préjugé en faveur du déterminisme qui, aujourd'hui, semble émerger de l'hypothèse selon laquelle la science physique du futur n'est qu'une simple image magnifiée de celle du passé.* »

Avant l'intervention de Maxwell, les succès de la physique mathématique et les impressionnantes réalisations de la thermodynamique balisent la grande route des sciences. Sous le soleil du déterminisme, elles s'avancent, faisant sortir de l'ombre, l'une après l'autre, les lois de la nature. En 1867, irrité par cette aveuglante lumière, Maxwell fait surgir son démon de sa boîte de molécules. Il invite alors les hommes de science à emprunter des chemins nouveaux, à explorer les instabilités, les singularités (les théories modernes, notamment celles du chaos et de la thermodynamique des processus loin de l'équilibre, s'inscrivent dans le droit fil de cette invitation).

Cette histoire de la naissance du démon maxwellien est décidément pleine de détours surprenants. La loi des erreurs, expression d'incertitudes pour l'astronome, devient loi de certitudes pour les "statistes" des sciences sociales. Dans un premier temps, elle conserve ce statut au sein de la théorie cinétique des gaz de Maxwell. Mais la situation se renverse rapidement à l'occasion d'un débat mêlant intimement, dans la Grande-Bretagne de l'époque, science, religion et philosophie : la science est invitée à intégrer la notion d'incertitude au cœur de ses développements.

Le plus étonnant n'est-il pas que le créateur de ce démon, annonciateur des concepts de la physique du siècle suivant, soit aussi l'auteur du plus grand succès de la physique mathématique et déterministe du XIXe siècle : les équations de l'électromagnétisme ? ■

# Le démon, les retours...

Après la mort prématurée de Maxwell en 1879, son démon continue de hanter la grande maison de la science. L'histoire de ses occurrences répétées est trop longue pour figurer ici. Cependant, si l'on pouvait...

... on verrait apparaître chez Thomson une "*armée idéale*" de démons de Maxwell, placés à l'interface d'un gaz froid et d'un gaz chaud, "*armés d'un club de golf, ou si l'on veut, d'une batte de cricket moléculaire*"...

... on mettrait en scène Boltzmann qui, sur les traces de Maxwell, bâtit un modèle microscopique de l'évolution irréversible d'une population de particules vers un état d'équilibre macroscopique. On suivrait le parcours de cet homme qui tenta en physique ce que Darwin avait accompli en biologie – donner un sens au temps de l'évolution – et aboutit à une impasse poignante, capitulant devant l'exigence de réversibilité des lois de la dynamique (Boltzmann s'est suicidé sur une plage de l'Adriatique en 1906...).

... on verrait se dessiner la figure de Maryan von Smoluchowski qui, en 1912, réduisit le démon de Maxwell à un système mécanique, un simple clapet moléculaire, et démontra l'impossibilité de son action (cf dessin p. 78). On se souviendrait de la phrase de Maxwell : "*Parce que nous ne sommes pas assez intelligents*".

... et on verrait alors un physicien, Léo Szilard[1], imaginer en 1929 un système doué d'intelligence (en tout cas de mémoire, cf. dessin ci-contre).

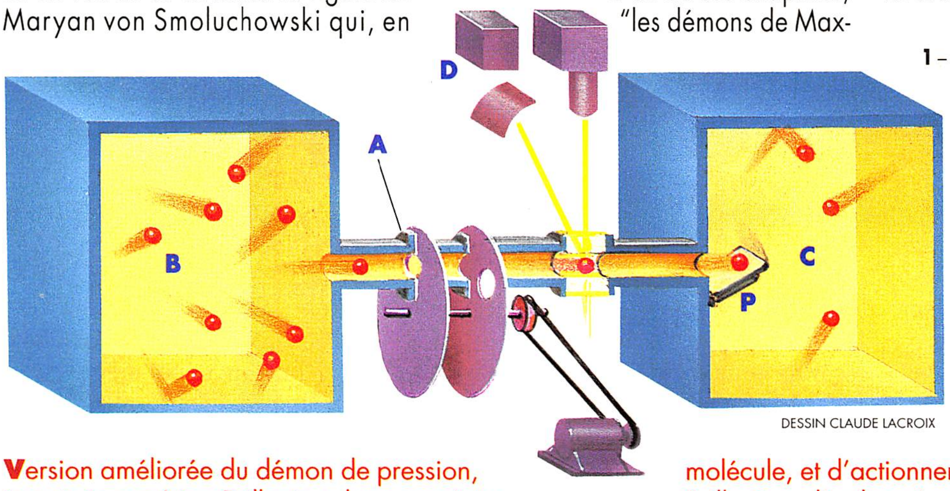
... plus tard, on lirait *la théorie de la science et de l'information* [2], de Léon Brillouin (1956) et l'on comprendrait qu'acquérir une information (observer les molécules, pour le démon) a toujours un coût, en termes d'entropie, et que le démon ne viole donc pas le second principe. On sourirait en entendant Brillouin déclarer que "*le démon est bien vieux et qu'il est temps de le mettre à la retraite.*"

... car, sorti par la porte de la physique, on verrait le démon rentrer par la fenêtre de la biologie : on ouvrirait le livre de Jacques Monod, Le *Hasard et la Nécessité* (1970), et le titre d'un de ses chapitres, "les démons de Maxwell", nous sauterait aux yeux. On lirait que, pour expliquer l'apparition de la vie, Monod donne aux enzymes le rôle organisateur des démons de Maxwell...

... puis, on lirait le livre d'un prix Nobel de physique et d'une philosophe, "Entre le temps et l'éternité" [3], qui ouvre une voie pour résoudre la contradiction, cristallisée par le démon de Maxwell, entre l'éternité, présente au cœur de la physique déterministe, et le temps du devenir, celui de l'aventure humaine...

... et on n'aurait pas fini !

Leo Szilard



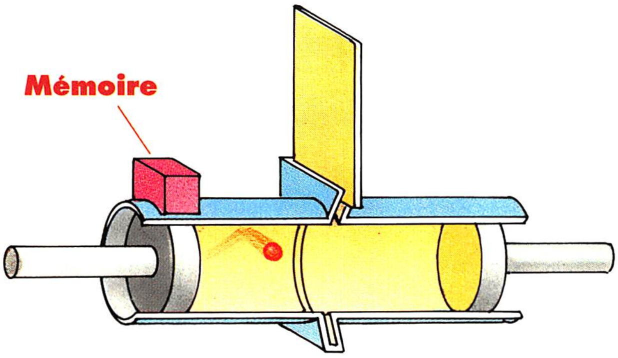

DESSIN CLAUDE LACROIX

1 – Léo Szilard est aussi l'homme qui rédigea la lettre, signée par Einstein et adressée au président Roosevelt, initiant le projet Manhattan (voir *Cahiers de Science et Vie* n° 7)

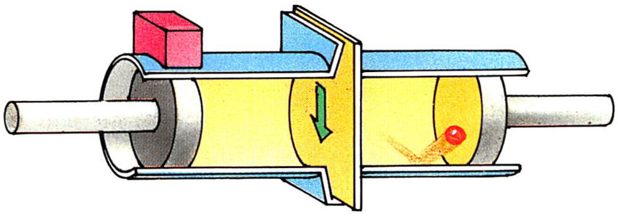
2 – L'ouvrage de Léon Brillouin est réédité chez Jacques Gabay Editions, Paris. Léon Brillouin est bien le même homme qui, en 1922, publia dans *la Science et la Vie* un article sur les théories d'Einstein (cf Cahiers "Einstein", p. 73). Après la guerre, la deuxième partie de sa carrière s'effectua aux Etats-Unis.

3 – "Entre le temps et l'éternité", Ilya Prigogine et Isabelle Stengers, Fayard 1988

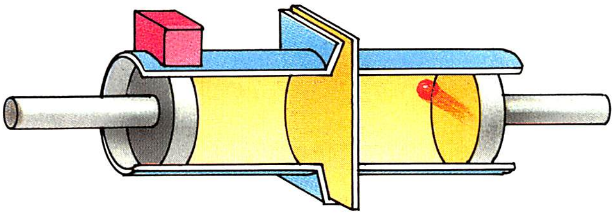
Version améliorée du démon de pression, imaginée par Léon Brillouin : deux enceintes B et C sont reliées par un tube, de section droite A, égale à la section de l'ouverture et à celle de la porte P. Un système de volets tournants, percés d'ouvertures de sections A, est réglé de manière à ne laisser passer que les molécules animées d'une certaine vitesse. Un faisceau lumineux traverse le tube : la lumière diffusée permet à un détecteur D de repérer la présence d'une molécule, et d'actionner l'ouverture de la porte P. Brillouin a développé une théorie selon laquelle toute acquisition d'information "se paie", a un coût thermodynamique. Ainsi, en calculant la quantité d'information nécessaire au démon pour qu'il soit efficace, c'est-à-dire qu'il crée une différence de pression, il montre que le rendement global de cette machine est inférieur à l'unité. Malgré les apparences, ce démon sophistiqué ne viole pas non plus le second principe...



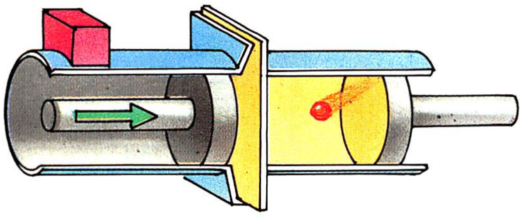

**1.** Le cylindre ne contient qu'une seule molécule.



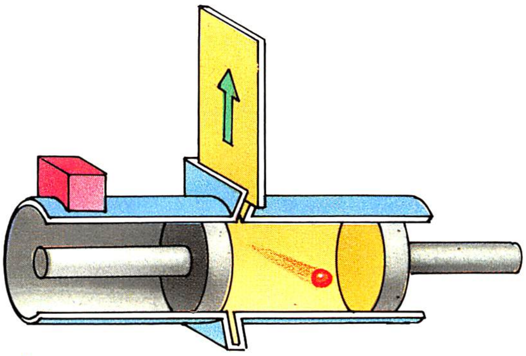
**2.** La cloison s'abaisse.



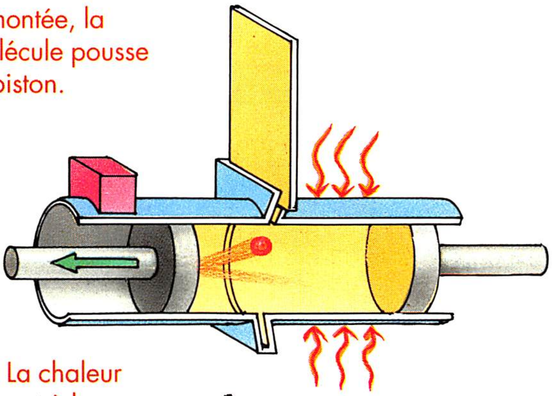
**3.** Le système observe et mémorise dans quelle moitié du cylindre se trouve la molécule.



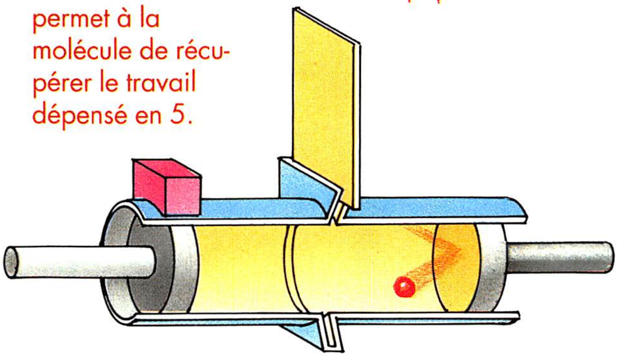
**4.** Le piston est repoussé, sans dépense de travail.



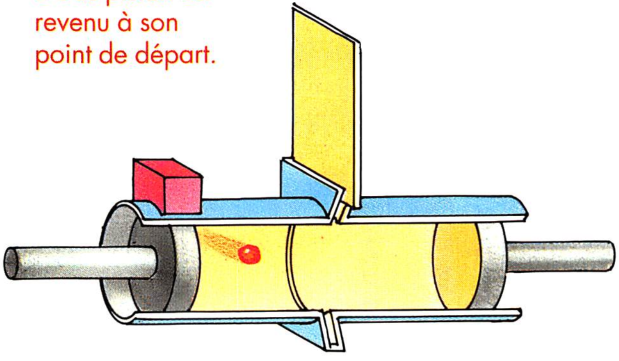
**5.** La cloison est remontée, la molécule pousse le piston.



**6.** La chaleur permet à la molécule de récupérer le travail dépensé en 5.



**7.** Le piston est revenu à son point de départ.



**8.** La mémoire s'efface, le cycle peut recommencer.

DESSINS CLAUDE LACROIX

**D**ans la version de Léo Szilard, en 1929, le démon est doué de mémoire. Le cycle de ce moteur à une seule molécule aboutit, semble-t-il, à transformer de la chaleur en travail, en violation du second principe de la thermodynamique. Le cylindre est fermé à chaque extrémité par un piston. Un système d'observation du contenu du cylindre est couplé à un système d'enregistrement du résultat des observations.

# Dernier des Classiques, Premier des Modernes

QUI ÊTES-VOUS M. MAXWELL ? SES CONTEMPORAINS ONT DIT DE LUI QU'IL ÉTAIT L'HÉRITIER DE NEWTON. LES PHYSICIENS ONT FAIT DE LUI LE PREMIER DES ICONOCLASTES MODERNES. LES CRITIQUES Y ONT VU LA TÊTE PENSANTE DU CAPITAL INDUSTRIEL. AUJOURD'HUI, D'AUTRES HISTORIENS SE DEMANDENT SI, TANT QU'À RECONSTRUIRE UNE HISTOIRE, IL NE VAUDRAIT PAS MIEUX UTILISER LES MATÉRIAUX D'ÉPOQUE.

PAR ANDREW WARWICK

Qui était James Clerk Maxwell ? A sa mort, en 1879, il n'avait encore que 48 ans, et sa réputation scientifique était à peine faite. Ses proches et ses collaborateurs étaient parfaitement conscients de ses qualités intellectuelles hors du commun. Ils n'ignoraient pas la portée de sa contribution à la branche la plus importante de la physique du XIX$^{e}$ siècle. Mais, toute originale et novatrice qu'elle fût, l'œuvre de Maxwell restait très théorique et mathématiquement ardue. Rares étaient donc les physiciens qui à cette époque comprenaient ses écrits, plus rares encore ceux qui tentaient de poursuivre ses travaux. Au cours des années 1870 et 1880, Maxwell n'eut qu'un petit groupe de partisans, dont la plupart étaient basés à Cambridge, à l'endroit même où il enseigna pendant ses huit dernières années d'existence, au Laboratoire Cavendish. Maxwell y tenait la chaire de physique expérimentale, mais il n'avait même pas été le premier à se voir offrir le poste : William Thomson et Hermann von Helmholtz, pressentis avant lui par l'Université, avaient décliné la proposition. Thomson, qui était alors le plus respecté des physiciens britanniques, restait farouchement opposé à l'orientation théorique adoptée par Maxwell sur l'électromagnétisme.

Cependant, dans les années qui suivirent sa mort, la réputation de Maxwell monta. Au fur et à mesure qu'elle était enlevée à son contexte victorien, son œuvre trouva sa place dans la préhistoire de la physique du XX$^{e}$ siècle. Et Maxwell se vit attribuer un siège au rang des génies, entre Newton et Einstein.

## Maxwell le victorien

La première biographie de Maxwell parut en 1882, tout juste trois ans après sa mort. Elle était signée par son fidèle ami Lewis Campbell et par son assistant au Cavendish, William Garnett. A la différence des historiens postérieurs, Campbell et Garnett ne cherchèrent pas à mettre en valeur l'originalité de l'œuvre de Maxwell : ils y voyaient plutôt le prolongement et la synthèse de la tradition britannique en philosophie naturelle. Maxwell, soutenaient-ils, avait "fait fructifier l'héritage" du plus res-

**D**ans l'esprit de Maxwell, les lois mathématiques appartenaient au genre de vérités qui supposent l'existence d'un dieu créateur (Dieu trace le cercle de la Terre, par William Blake).

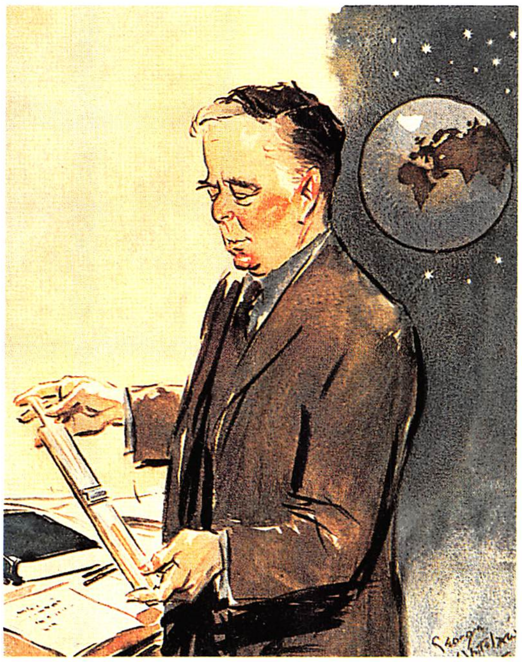
J.L. CHARMET - WITWORTH ART GALLERY, MANCHESTER

pecté des philosophes anglais, Isaac Newton, et "consolidé" l'œuvre du plus grand expérimentateur britannique, Michael Faraday. Aux yeux de Campbell, du reste, l'existence de Maxwell ne se réduisait pas à l'énumération de ses réussites professionnelles. Son apport à la physique, sa nomination à la tête du Cavendish : tout cela interdisait de douter de ses capacités intellectuelles. Mais, pour Campbell, l'enseignement le plus précieux, pour le public de l'époque, était celui de sa vie irréprochable d'ami fidèle, de mari dévoué et de chrétien pratiquant.

Campbell se donna beaucoup de mal pour fournir à ses lecteurs un tableau complet des qualités personnelles exceptionnelles de Maxwell. Sa vie, écrivait-il, avait été d'une "grande simplicité" , bien qu' "extraordinairement active". Maxwell était un homme humble, modeste, réservé et pourvu d'un solide sentiment de la justice ; il possédait également la qualité victorienne essentielle de combiner une robuste "foi dans le progrès" avec un "respect véritable pour le passé". De cette qualité, Campbell estimait qu'elle avait favorisé le travail scientifique de Maxwell par un dosage adéquat de hardiesse de la pensée et de conservatisme pratique. Théologien anglican et ex-prêtre, Campbell soutenait également que la vie de Maxwell démontrait la parfaite compatibilité de la science et de la religion. A une époque où les pouvoirs et les privilèges du clergé anglican étaient sévèrement remis en cause par un parlement réformiste et par l'émergence d'une science laïque soutenue par l'Etat, Maxwell donnait l'exemple d'un scientifique de haut niveau dont la foi chrétienne n'avait pas vacillé, même – comme Campbell l'exposait avec force détail – face à une mort prématurée, longue et douloureuse.

## PHYSICIENS ET PHILOSOPHES

Au cours du demi-siècle suivant, la réputation de Maxwell connut une profonde mutation. Son œuvre en électrodynamique et en thermodynamique fut



MARY EVANS P. L. - EXPLORER

James Jeans, astrophysicien britannique célèbre dans les années 20, faisait de Maxwell l'égal de Newton (*Punch*, dessin de Whitelaw, 1935).

ND - VIOLLET

Maxwell fut d'abord célébré comme un homme aussi pieux, vertueux et austère que le voulait l'époque (peinture de Calissendorff).

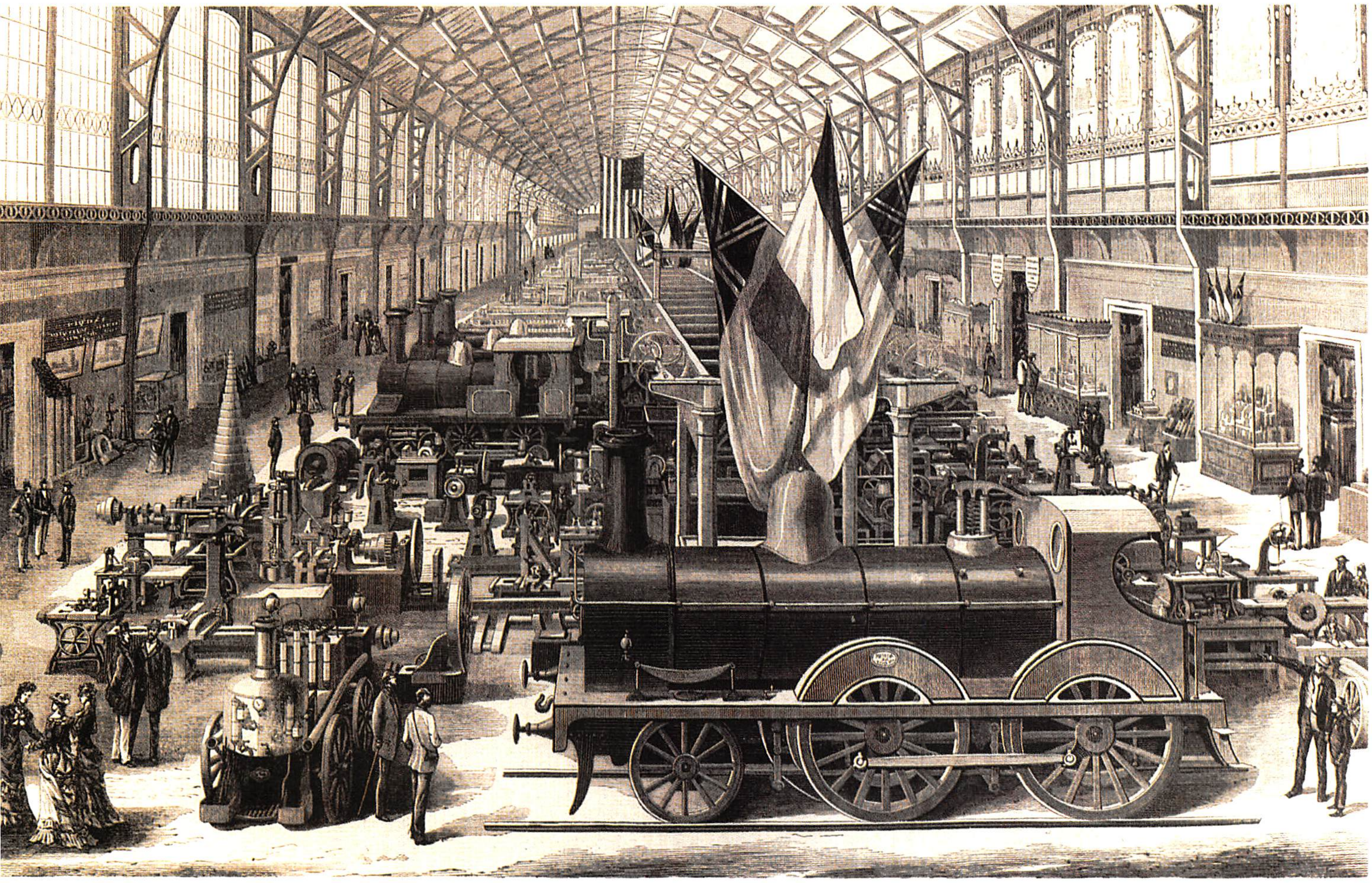
reprise par les théoriciens germanophones. Elle les aida à énoncer les questions qui devaient amener, au début du XX^e^ siècle, les révolutions quantiques et relativistes. En conséquence de ces dernières, l'œuvre de Maxwell se trouva réduite dans les années 1920 au formalisme mathématique des quatre fameuses équations de l'électromagnétisme.

Entre-temps, la communauté naissante des physiciens théoriques s'était employée à remodeler le personnage de Maxwell à leur image. En lieu et place du mathématicien façon Cambridge et du gentleman bien pensant qu'avaient décrit les biographes du siècle dernier, les physiciens du XXe siècle voyaient un théoricien révolutionnaire. Ainsi Einstein ne considérait-il pas la théorie des champs électromagnétiques de Maxwell comme un prolongement de l'œuvre de Newton, mais au contraire comme la première infidélité au maître que le XIXe siècle se soit permise. De plus, soutenait Einstein, c'était précisément cette infidélité qui avait mené à sa théorie de la relativité. La réputation de Maxwell se voyait donc transformée à titre posthume par sa compromission dans la physique du XXe siècle. Dans la même veine, le célèbre cosmologiste et vulgarisateur britannique James Jeans minimisa les très importantes recherches expérimentales de Maxwell, de même que son action comme directeur du Cavendish, en affirmant que Maxwell n'avait jamais « *ressenti d'intérêt profond pour la méthode expérimentale, ni montré de talent exceptionnel comme expérimentateur* ». Selon Jeans, Maxwell était tout simplement le « *plus grand physicien mathématicien du monde depuis Newton* ».

A la fin des années 1920, les physiciens se trouvaient en fait pris dans une contradiction à propos de Maxwell et de sa place dans l'histoire de leur discipline. D'un côté, ils reconnaissaient son rôle de précurseur de la théorie de la relativité et de la physique quantique ; de l'autre, il était clair que ces nouvelles théories avaient détrôné l'œuvre de Maxwell proprement dite. On tourna le problème en rangeant l'œuvre de Maxwell dans la catégorie nouvellement créée de la "physique classique". Le terme avait pour vocation de rassembler toute la physique produite entre la publication des *Principia* (1687) par Newton et les théories quantiques et relativistes. En gommant les différentes traditions et les conditions historiques particulières dans lesquelles des hommes comme Newton, Laplace et William Thomson avaient travaillé, les physiciens du XXe siècle forgeaient une histoire simple et linéaire de leur discipline, embrassant tout ce qui s'était fait de Newton à la fin du XIXe siècle. Qui plus est, selon Max Planck, c'était à Maxwell que revenait le droit de « *trôner au-dessus du portail de la physique classique* ». Cette histoire vue par les physiciens désignait Maxwell comme l'homme qui était venu poser la dernière pierre à l'édifice de la physique

Max Planck et les grands physiciens du début du XXe siècle voient en Maxwell leur précurseur.

MARY EVANS P.L. EXPLORER



L'ILLUSTRATION - SYGMA - KEYSTONE

classique et, ce faisant, avait mis en lumière les manques que devait combler l'œuvre révolutionnaire de Planck et d'Einstein. C'est donc à titre posthume que Maxwell accéda au rang de génie.

Le bouleversement conceptuel opéré par les théories de la relativité et la mécanique quantique déclencha un regain de réflexion philosophique sur les fondements logiques de la physique et sur la nature de la méthode scientifique. Des penseurs comme Moritz Schlick et Karl Popper, profondément frappés par l'incapacité des philosophes du XIX$^{e}$ siècle à prévoir l'arrivée de ces nouvelles théories, placèrent la physique au centre de leurs préoccupations. Ils se penchèrent tout spécialement sur la question du rôle des modèles et des analogies dans le développement de la théorie physique. Or Maxwell avait eu recours aussi bien à des modèles mécaniques (l'éther électromagnétique) qu'à des analogies physiques (entre la dynamique des fluides et l'électrostatique), dont il avait tiré un remarquable profit. Son œuvre se retrouva donc sous le feu des projecteurs. L'intérêt à la fois historique et philosophique qu'on lui portait crût rapidement dans les années 1950 et 1960 en même temps que se développait, en Angleterre et aux Etats-Unis, une nouvelle discipline nommée "histoire et philosophie des sciences". Prenant modèle sur Alexandre Koyré et Thomas Kuhn, une nouvelle génération d'historiens professionnels – souvent venus de la physique – se joignit aux philosophes pour examiner ce que les physiciens avaient trouvé de si novateur dans l'œuvre de Maxwell. Ce nouveau courant, à la fois historique et philosophique, s'occupa d'abord d'éclairer les arcanes mathématiques de l'œuvre de Maxwell et d'en tirer des arguments pour ou contre telle ou telle théorie épistémologique à la mode.

**Dans les années trente, des études marxistes font des intérêts économiques de la classe gouvernante le moteur des idées scientifiques.**

## LES HISTORIENS

Parmi les historiens, les études maxwelliennes connurent, sous l'influence de l'historien marxiste Boris Hessen, un autre tournant important au début des années trente. En 1931, en effet, Hessen fit une communication au congrès international d'Histoire des sciences réuni à Londres, intitulée : *Les fondements économiques et sociaux des* Principia *de Newton*. Un certain nombre de marxistes britanniques furent très im-

pressionnés par cette nouvelle façon d'aborder Newton à partir du contexte économique et social du XVIIe siècle anglais. J. G. Crowther entreprit d'appliquer la même méthode à une série de biographies de savants anglais du XIXe siècle. Crowther s'efforça donc d'expliquer l'œuvre de Maxwell à partir des données politiques, économiques et sociales de l'époque. Selon lui, l'université de Cambridge, où Maxwell avait étudié et enseigné, était une institution dont la fonction était de satisfaire les besoins de la classe dominante britannique en moyens intellectuels. Ainsi, l'importance donnée aux études d'astronomie à Cambridge avant le XIXe siècle pouvait s'expliquer comme "une conséquence de la dépendance des techniques de navigation vis-à-vis de cette science, et de la dépendance de toute puissance maritime vis-à-vis de ces techniques". Au temps de Maxwell, selon Crowther, les industriels capitalistes se trouvaient avoir besoin d'une connaissance scientifique de la chaleur et de l'électricité pour développer la machine à vapeur et la dynamo. Maxwell n'avait donc rien fait d'autre que servir la classe gouvernante anglaise, en devenant le « *champion de l'adaptation à ses besoins de la physique qui se faisait à Cambridge* ».

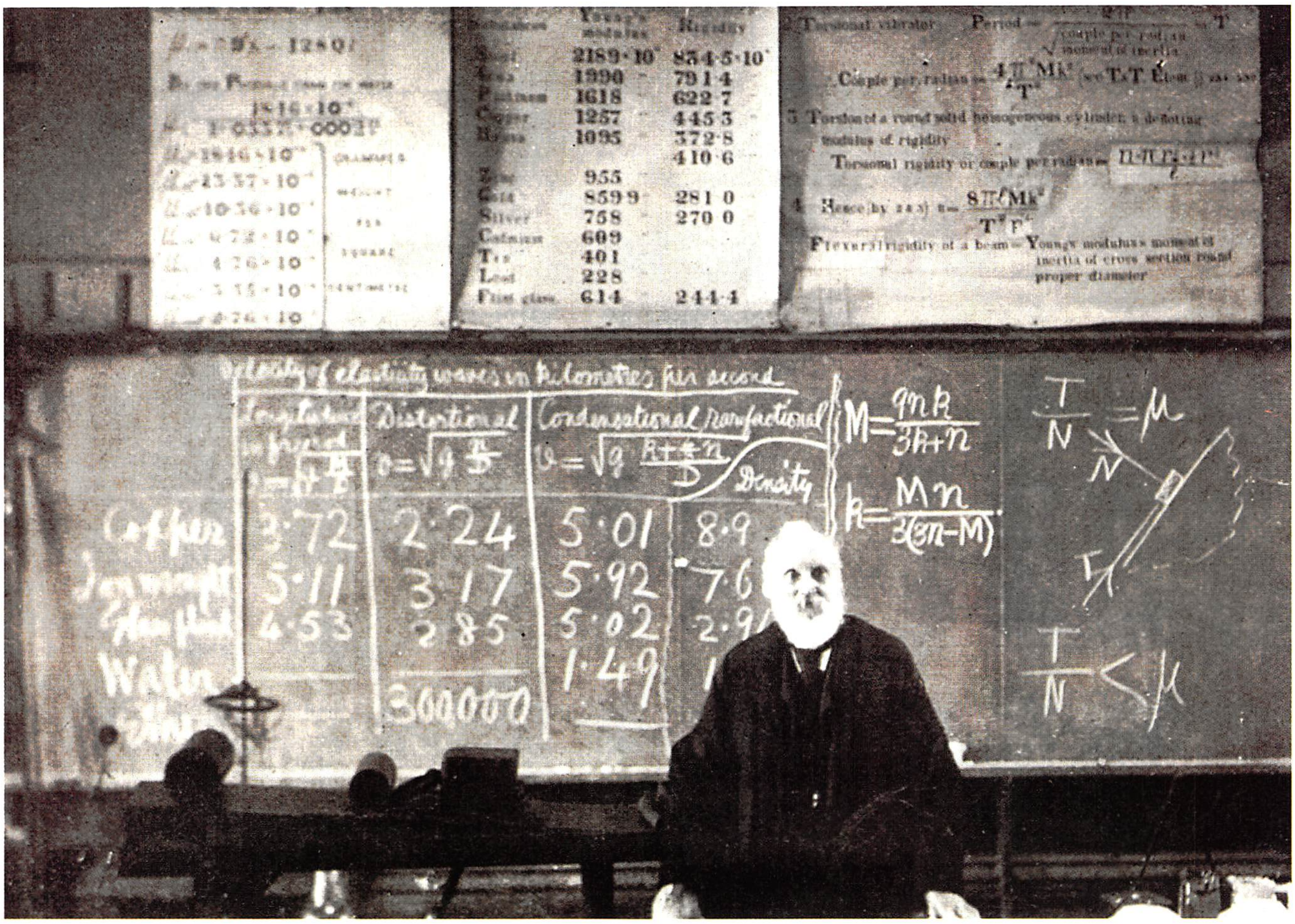
CAVENDISH LABORATORY, CAMBRIDGE

Les équations de Maxwell furent, selon J. D Bernal, les conditions indispensables au développement des industries électriques.

L'approche assez simpliste de Crowther lui permettait difficilement de rendre compte du personnage historique de Maxwell. Ses origines aristocratiques, sa religiosité, où Campbell n'avait vu que des vertus, se révélèrent une gêne pour un marxiste comme Crowther. Il se sentit obligé de trouver une explication au fait qu'un homme, qu'il décrivait comme un « *génie de dimension mondiale* », soit resté un chrétien pratiquant, menant la vie moyenâgeuse d'un *gentleman farmer* lorsqu'il était sur ses terres d'Ecosse. Crowther s'en tira en opposant la "modernité" de la science de Maxwell à "l'archaïsme de ses idées sociales et religieuses". Il déplorait que Maxwell n'eût pas adopté une vue plus éclairée de la société, mais rassurait son lecteur en suggérant que cette manière de se cacher derrière des "conceptions archaïques" permettait à Maxwell de camoufler le caractère révolutionnaire de son travail à Cambridge, et lui ménageait une « *position dominante (...) dans le développement de la culture capitaliste* ».

Cette tentative sommaire d'approche socio-économique de Maxwell eut une suite, menée par d'autres historiens marxistes. A la fin des années 1940, le cristallographe J.D. Bernal – qui s'inspirait également du travail de Hessen sur Newton – attribua le succès de la théorie électromagnétique de Maxwell à la montée des industries électriques. Les célèbres équations de Maxwell étaient, à ses yeux, les instruments théoriques nécessaires au développement ultérieur des constructions électriques, fruit d' "une interaction complexe de la théorie et de la pratique".

Depuis une quinzaine d'années, une nouvelle génération d'historiens des sciences s'efforce de pratiquer une histoire qui soit à la fois celle des idées, des conditions économiques et de la société. L'objectif, en l'occurrence, est de brosser un tableau infiniment plus riche et sensible des rapports entre Maxwell et son époque. On ne se contentera plus de décrire le penseur solitaire capable de briser le corset intellectuel de la science de son époque. On nous invite à découvrir un Maxwell pur produit de la société victorienne, en tant que celle-ci mettait en œuvre ses moyens culturels pour accomplir ses idéaux. On admettra donc, par exemple, que Maxwell était un chercheur de talent. Mais il faut savoir qu'il avait été formé en mathématiques à Cambridge, et que c'est là qu'il avait acquis les techniques de calcul qu'il appliqua par la suite à son essai sur les anneaux de Saturne, à la théorie cinétique des gaz, à la théorie électromagnétique de la lumière. Le succès de Maxwell en physique mathématique exige donc de comprendre pourquoi l'Angleterre victorienne choisissait d'enseigner les mathématiques appliquées à son élite intellectuelle. De la même façon, son fameux modèle d'éther électromagnétique à pignons provient tout droit de la culture d'ingénieur dans laquelle sa situation de jeune chargé de cours au King's College de Londres le plongea. Historiens et philosophes ont longtemps bataillé pour essayer de comprendre d'où pouvait provenir cette étrange machinerie. On vient tout juste de découvrir son origine. Au début des années 1860, époque où il faisait de grands efforts pour construire sa théorie électromagnétique, Maxwell se servit des outils intellectuels qu'il avait reçus et des moyens techniques qui étaient à portée de sa main. Des travaux récents ont également montré que Maxwell s'inspira des



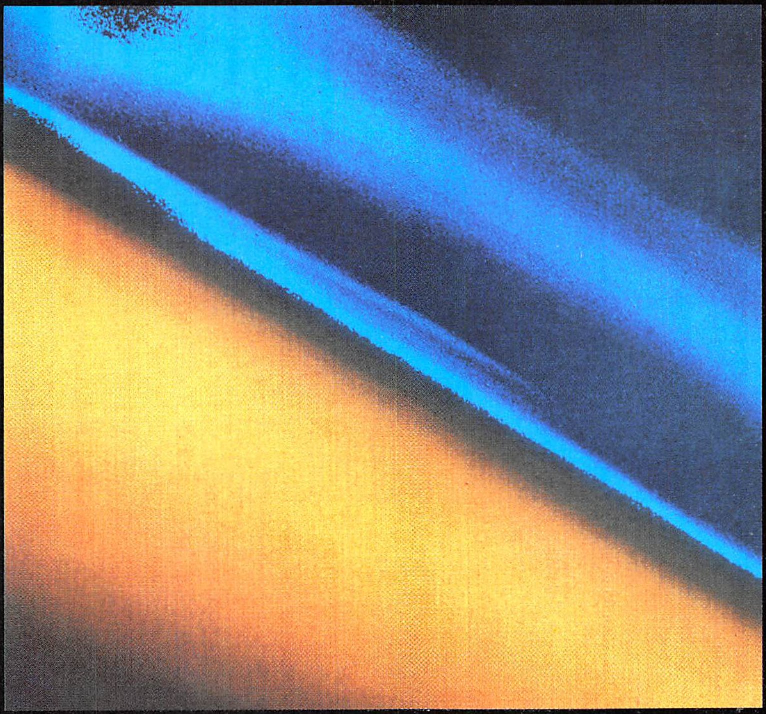
ANN ROMAN P.L.

Le dernier cours de Lord Kelvin : au XIX$^{e}$ siècle, les mathématiques ont conquis l'Université britannique. Pourquoi ?

études de population pour développer sa fameuse loi de distribution des vitesses des molécules dans les gaz. En effet, pour résoudre le problème de la distribution des vitesses, Maxwell considéra que les vitesses d'une collection de molécules de gaz devaient se répartir autour d'une moyenne de la même façon que certaines caractéristiques humaines dans une population.

Cette réévaluation de Maxwell et de son œuvre bénéficie du fait que les historiens des sciences commencent aujourd'hui à porter sur leur discipline un regard historique au sens plein du terme. Lorsqu'ils considèrent la philosophie naturelle des siècles passés, ils ne s'occupent plus de savoir ce qui, du point de vue de la science moderne, est scientifique ou ne l'est pas, est rationnel ou ne l'est pas. De tels présupposés ne permettent pas de tenir compte des catégories du savoir et des formes sociales différentes des nôtres qui donnaient autrefois son sens et sa portée à la philosophie naturelle. A cet égard, Maxwell est un cas d'école. Ses idées religieuses et le milieu industriel où il évoluait ont été considérés – à supposer qu'ils l'aient vraiment été – comme dépourvus de rapport avec sa physique ; mais Maxwell lui-même ne pratiquait pas cette distinction. En 1873, par exemple, au cours d'une célèbre conférence à la Bristish Association, il affirma que la spectroscopie stellaire fournissait une excellente preuve de l'existence de Dieu et de la fausseté de la théorie de l'évolution. Le spectroscope montrait en effet que les atomes de tous les éléments connus étaient les mêmes partout où ils étaient présents dans l'Univers. C'était, selon Maxwell, la preuve définitive qu'il s'agissait d'objets manufacturés, au même titre que le mètre standard ou que la vis de l'ingénieur Whitworth. La spécificité et la permanence d'atomes "manufacturés" était pour lui une preuve suffisante que Dieu avait "fabriqué" l'Univers. Maxwell s'appuyait donc sur la physique de pointe et les techniques industrielles pour étayer un argument théologique qui, à l'époque, était capable de convaincre une bonne partie de son auditoire. Aujourd'hui, au même endroit, il serait accueilli par des rires. Mais il est clair que, dans le monde ou vivait Maxwell, cet argument avait sa place au même titre que le courant de déplacement ou que la théorie électromagnétique de la lumière. ■

# ET MAINTENANT



SI LES ONDES SONT "HERTZIENNES" ET NON "MAXWELLIENNES", CE N'EST PAS SEULEMENT PAR INGRATITUDE. AUSSITÔT FONDÉE, LA SCIENCE ÉLECTROMAGNÉTIQUE S'EST INCARNÉE EN DES DOMAINES SI DIVERS ET SI SPÉCIALISÉS QUE CHACUN D'EUX A REQUIS DES OUTILS SUR MESURE. AUSSI, LA "CLÉ UNIVERSELLE" FORGÉE PAR MAXWELL A-T-ELLE SOUVENT DORMI SUR LA PLUS HAUTE PLANCHE DES ÉTAGÈRES. QU'EN FAIT-ON AUJOURD'HUI ?

IMAGE SELECT

# DES RADARS AUX FIBRES OPTIQUES...

LES FORMULES DE MAXWELL SONT-ELLES SEULEMENT BONNES À PENSER ? JUSQU'IL Y A PEU, ENCORE, LEUR MANIEMENT PAR LES INGÉNIEURS S'AVÉRAIT SOUVENT PLUS COÛTEUX EN EFFORTS QU'UN FIN BRICOLAGE DE LABORATOIRE. MAIS LA PUISSANCE DE CALCUL DES ORDINATEURS PERMET AUJOURD'HUI DE LES REMETTRE AU TRAVAIL, POUR RÉSOUDRE AVEC DES FORMULES SIMPLES DES PROBLÈMES FORT COMPLIQUÉS.

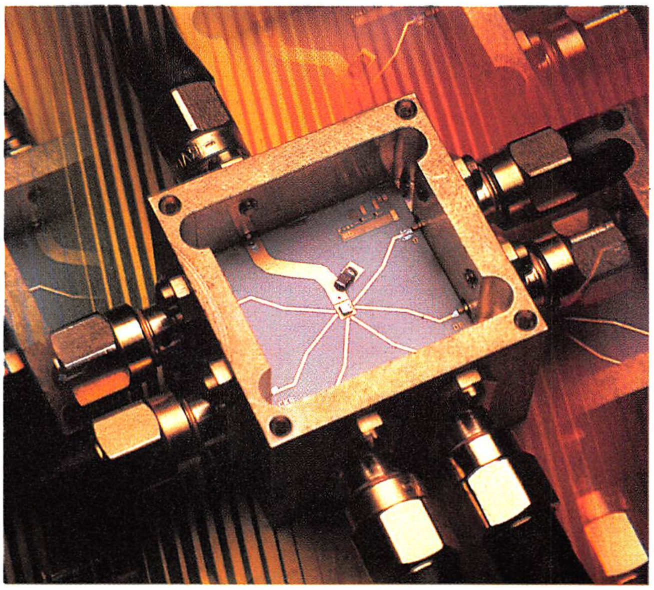
PAR CHARLES VASSALLO

La fenêtre du bureau est ouverte : dans toute la rue, un puissant autoradio fait résonner la trompette de Miles Davis. La radio d'un coursier crépite ; ailleurs, un téléphone sonne... A la télévision, un journaliste s'interroge : la Nasa n'arrive pas à reprendre contact avec la sonde Mars Observer ; les images de la planète rouge, tant attendues, nous parviendront-elles un jour ?

Le début du papier est tout trouvé ! Les doigts courent sur les touches du clavier : à chaque frappe, un flux d'électrons, correctement dirigé sur l'écran cathodique de l'ordinateur, déclenche l'affichage d'une suite ordonnée de caractères. La fine pellicule métallique du disque dur enregistre le fruit de ces cogitations. Dehors, l'orage gronde. Le ciel s'assombrit : en s'allumant, les tubes au néon diffusent cette lumière si désagréable. Soudain, un éclair zèbre le ciel. Panne de courant. Tout s'arrête... La puissance électromagnétique de l'éclair a eu raison de l'incessant mouvement des charges électriques qui, invisibles, permettaient à tout un chacun d'écrire, de lire, d'agrémenter les embouteillages avec quelques notes de musique...

Que l'on soit auteur d'articles scientifiques, amateur de jazz ou directeur de la Nasa, il est impossible, aujourd'hui, d'y échapper : nous vivons dans un monde électromagnétique. Notre perception en est d'autant plus vive quand il cesse de "tourner"...

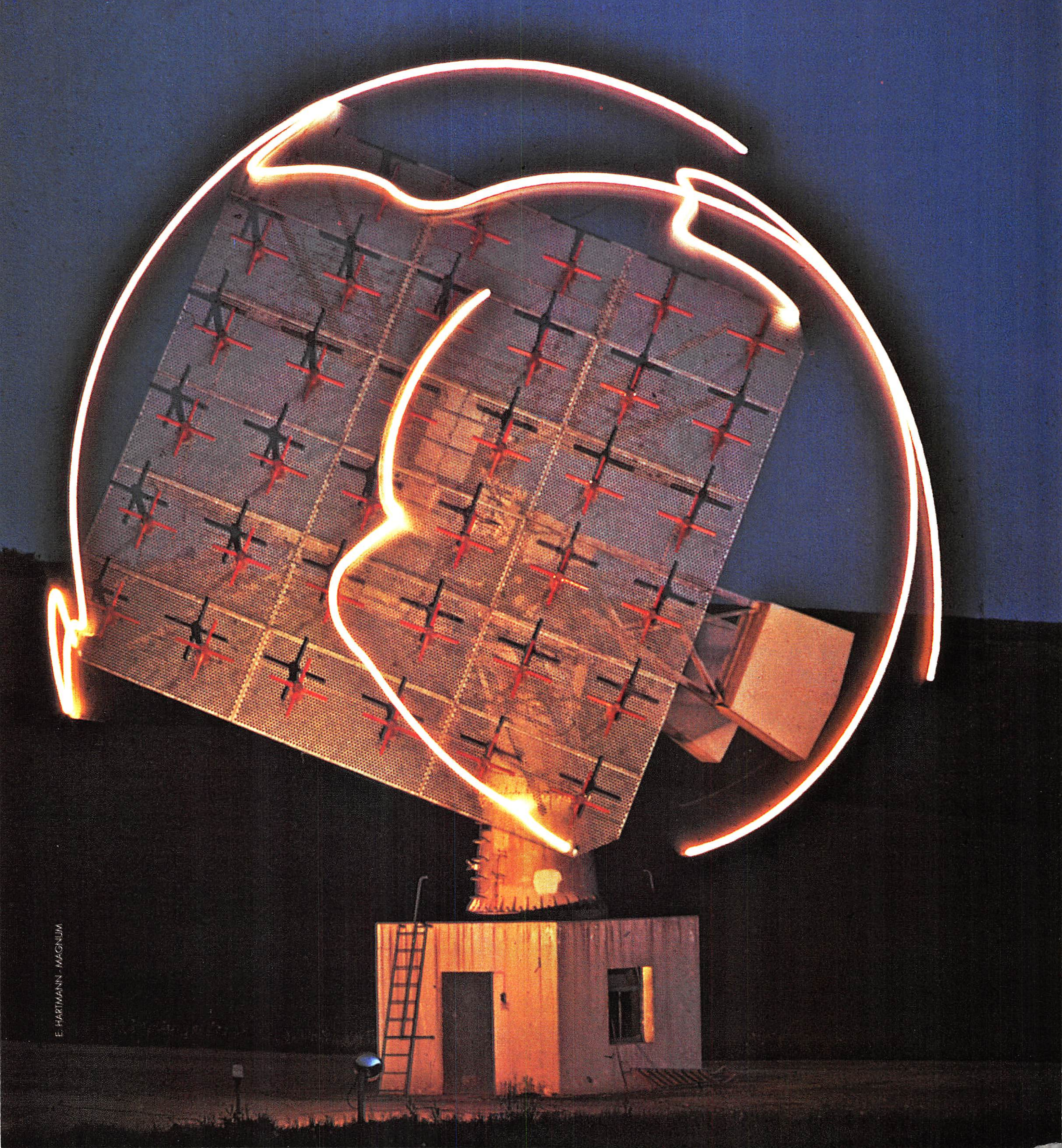
Tous ces dispositifs (radio, télévision, sonde spatiale ...) révèlent-ils ainsi la formidable puissance des "équations de Maxwell" dont ce numéro des *Cahiers de Science et Vie* raconte la génèse ? Soyons lucides : même si toute charge électrique en mouvement engendre des phénomènes régis par les lois de Maxwell, les concepteurs d'écrans cathodiques, les dessinateurs d'antennes de télévision n'ont pas eu besoin de "résoudre" ces savantes équations differentielles. Le voudraient-ils qu'ils en seraient d'ailleurs incapables dans la plupart des cas... Peut-on pour autant affirmer qu'aujourd'hui, ces équations sont mortes, statufiées, coulées dans le



CNET LANNION

En vue de leur installation à bord de satellites, d'avions, etc., les circuits micro-ondes modernes sont soumis à d'importantes contraintes de miniaturisation.

Pour des raisons liées à la simplicité de leur conception, les antennes de télécommunication ou de radar avaient traditionnellement la forme de paraboles. Le traitement numérique des équations de Maxwell, ou de formulations dérivées, a renouvelé le dessin des antennes modernes.



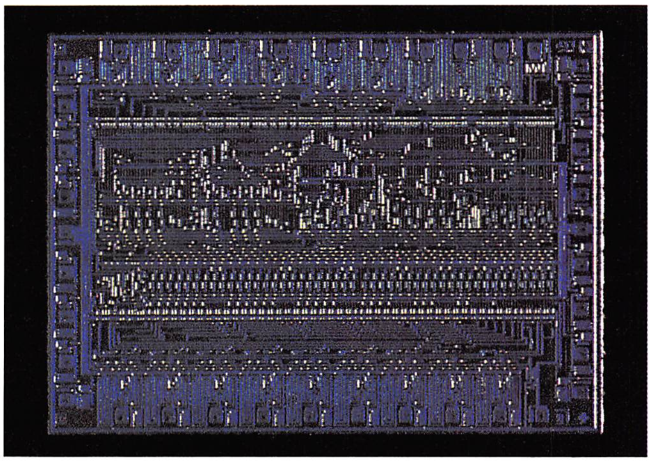
E. HARTMANN - MAGNUM

bronze des plus belles réussites de l'histoire des sciences[1] ? Sont-elles tout juste bonnes à être enseignées pour, vite, tomber dans l'oubli des ingénieurs, trop occupés à concevoir des objets techniques ?

A ces questions, on aurait probablement répondu par l'affirmative il y a quelque vingt-cinq ans. Les théoriciens de l'électromagnétisme étaient alors dans une situation inconfortable. Pour mettre au point des circuits micro-ondes (amplificateurs de radar, par exemple), il n'était pas rare d'entendre qu'un bon artiste de la fraiseuse et du chalumeau était bien plus utile qu'un théoricien. Il est vrai que ces dispositifs s'apparentaient fortement à de la "microplomberie" (voir photo). A ces fréquences (plusieurs gigahertz), la transmission des signaux ne s'effectue pas dans des conducteurs pleins, comme le courant électrique usuel à 50 Hz, mais dans des "guides d'ondes" (de petits tuyaux métalliques). Quand le guide d'onde a une géométrie simple (rectiligne et de section rectangulaire), il est relativement aisé de résoudre les équations de Maxwell pour déterminer son fonctionnement. En revanche, dès que la géométrie se complique (coudes serrés, bifurcations en Y, ...), les calculs théoriques sont ardus. A l'époque, on déroulait d'interminables équations, on posait quelques hypothèses simplificatrices ici ou là, sans être véritablement certain que tous ces calculs aboutiraient à une "solution". Rien d'étonnant donc à ce qu'on ait alors privilégié l'approche expérimentale pour obtenir des réponses rapides à des problèmes pratiques. L'efficacité prime...

La situation a aujourd'hui fortement changé. Comme dans bien d'autres domaines, l'irruption de l'ordinateur dans les laboratoires a bouleversé les méthodes de travail. Par ailleurs, la "pression de miniaturisation" a notablement changé les gammes de fréquences ainsi que les techniques de fabrication des circuits. La "micro-plomberie" n'est plus adéquate et la mise en œuvre des nouvelles techniques est beaucoup plus lourde. Pour des raisons de coûts, le développement ne peut plus se faire de manière empirique. D'où un regain d'estime pour les théoriciens de l'électromagnétisme, dépositaires des équations de Maxwell... Parcourons ensemble quelques-uns des champs d'investigation qu'ils ont été récemment invités à explorer.

A partir des années 1970, l'industrie du verre a été en mesure de fabriquer des fibres optiques. Celles-ci sont susceptibles de "guider" la lumière, qui n'est rien d'autre qu'une onde électromagnétique à très haute fréquence ou, exprimé d'une autre manière, à très courte longueur d'onde (de l'ordre du micron). Il a donc fallu développer des modèles afin de répondre à diverses questions pratiques : pourquoi perd-on de l'énergie dans des coudes trop serrés? Quels mécanismes limitent le débit d'information qu'on peut faire passer dans une fibre, etc.? Au croisement des modélisations et des recherches expérimentales, une intense activité a ainsi donné naissance à une efficace théorie des fibres optiques. Parallèlement, pour rendre compte du comportement de la lumière dans des guides diélectriques[2], une théorie plus générale a commencé à s'élaborer. Elle sert désormais de base pour développer des "circuits optiques intégrés", à l'image des circuits électroniques intégrés (les célèbres "puces"). S'ouvre ainsi une voie qui, tôt ou tard, donnera naissance à des ordinateurs optiques et multipliera les vitesses de calcul disponibles.



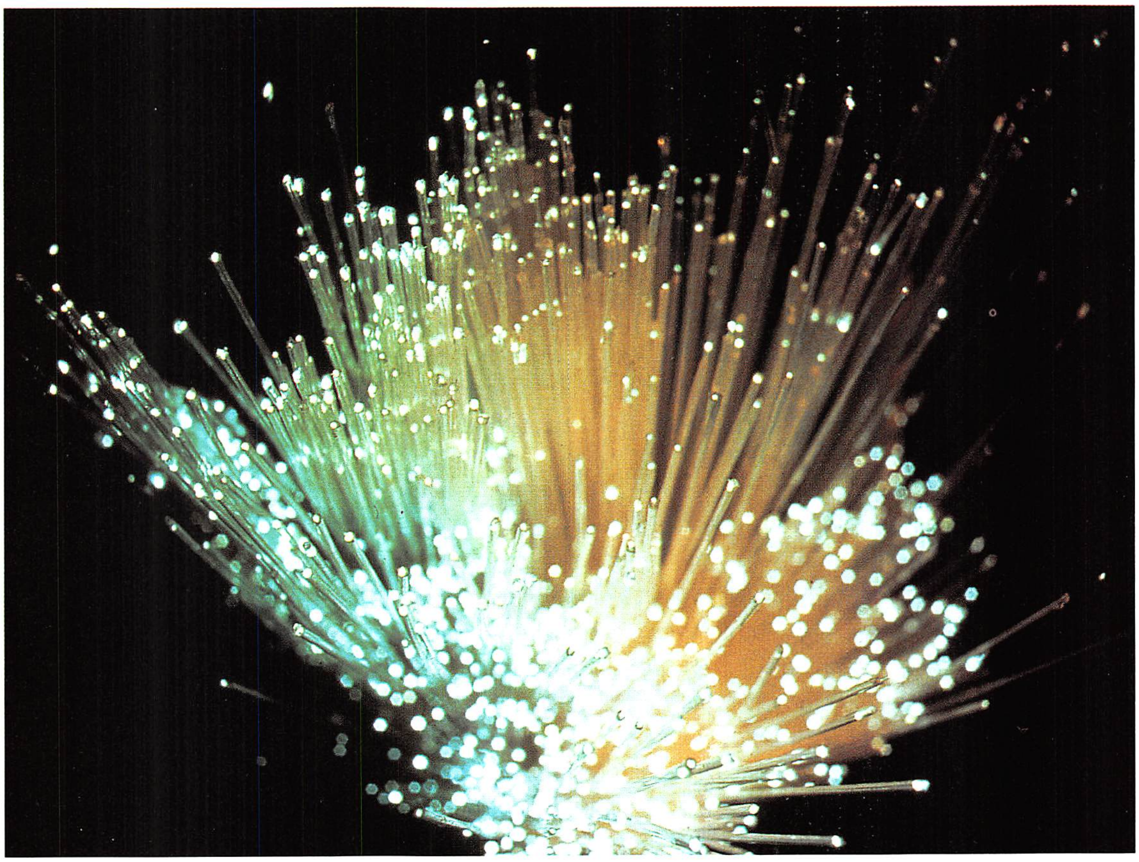
E. HARTMANN · MAGNUM

Nous l'avons dit, les circuits micro-ondes modernes n'ont plus rien à voir avec l'assemblage de microtuyaux métalliques d'il y a seulement vingt ans. Les signaux sont le plus souvent guidés à l'intérieur de fines couches métallisées, déposées sur des plaques diélectriques. Suivant les besoins, le tout est parfois enfermé dans un guide métallique. On peut inclure la théorie de ces guides dans le cadre général des guides diélectriques. Cependant, leurs méthodes d'études ne sont généralement pas applicables au domaine des guides optiques, à cause du comportement très différent des métaux en micro-onde et en optique. Dans le premier cas, les métaux sont pratiquement des mi-

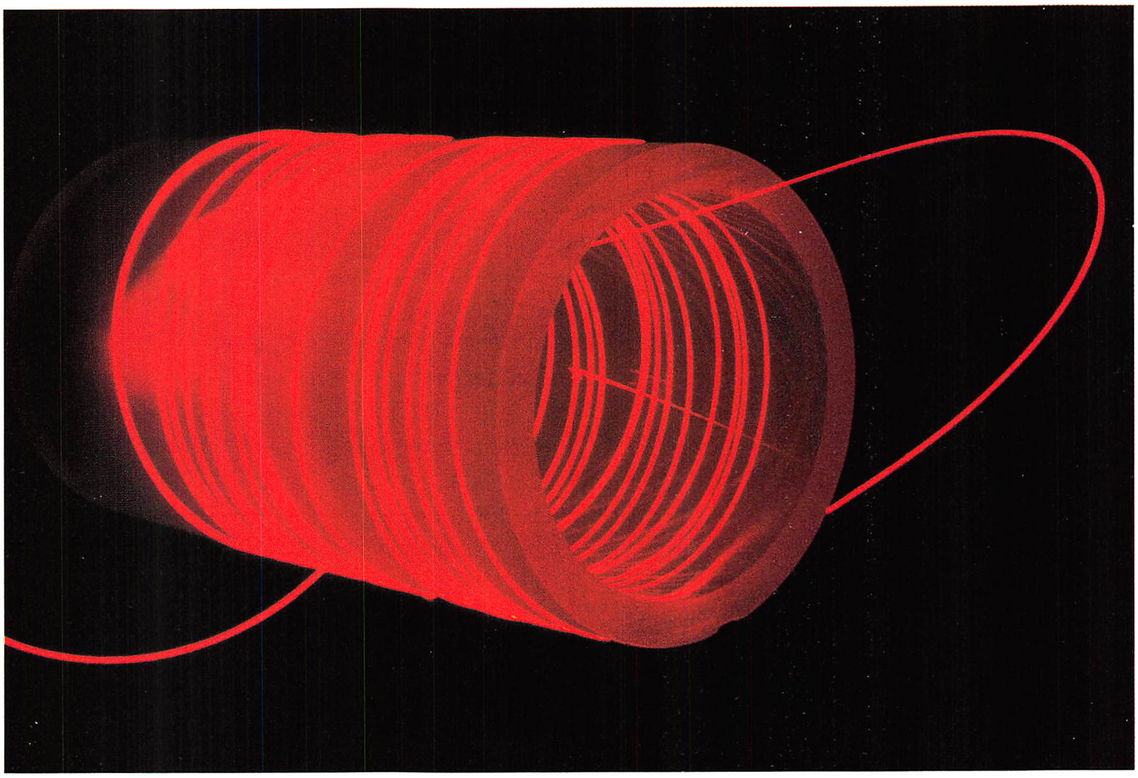
**1** – Signalons tout de même que c'est depuis une vingtaine d'années seulement qu'on sait définir de manière complètement satisfaisante les vecteurs **E**, **D**, **B**, **H** intervenant dans les équations de Maxwell. L'essentiel du travail théorique, partant de la constitution atomique de la matière, avait été fait par Lorentz au début du siècle, mais la parfaite cohérence de l'édifice a attendu soixante ans pour être définitivement établie.

**2** – Diélectrique signifie non-conducteur de l'électricité (synonyme d'isolant).

roirs idéaux : ils arrêtent net le champ, et cette propriété est abondamment mise à profit dans la modélisation. Dans le second cas, les métaux ne sont que des diélectriques médiocres, dans lesquels le champ pénètre partiellement sur une fraction de longueur d'onde. On comprendra que ce comportement physique différent (d'ailleurs contraire à l'intuition) induise des approches mathématiques différentes...



**A** partir des années 1970, l'industrie du verre a su fabriquer des fibres optiques, capables de "guider" des signaux lumineux. De nombreux problèmes pratiques ont surgi : pertes d'énergie, erreurs de transmission, etc. Leur résolution a exigé le développement d'une théorie efficace des guides optiques. Elle sert désormais de base pour la conception de circuits optiques intégrés (page de gauche), futurs éléments d'ordinateurs aux vitesses de calcul insoupçonnées...



PHOTOS E. HARTMANN - MAGNUM

Les circuits micro-ondes extrêmement sophistiqués s'intègrent notamment dans les radars développés pour des besoins militaires. Ces radars ont généralement deux fonctions, émission et réception, qui, schématiquement, s'enchaînent. Le radar émet d'abord une onde électromagnétique dans un certain volume de l'espace ; si un avion

est présent dans le volume, l'onde se réfléchit sur cet obstacle métallique ; dans sa phase réception, le radar doit ensuite être capable de détecter cette onde réfléchie, qui possède alors une faible énergie. La guerre du Golfe a fait surgir au grand jour les résultats du travail de recherche mené sur la partie intermédiaire de ce cycle : la réflexion de l'onde sur l'avion (bien que fort utiles, les circuits micro-ondes d'émission/réception sont trop petits pour donner lieu à des images spectaculaires...). Les formes si peu aérodynamiques de l'avion furtif américain F-117 sont précisément à mettre au crédit du développement de la théorie géométrique de la diffraction du champ électromagnétique[3]. Cette théorie s'adresse principalement aux objets diffractants dont les dimensions sont grandes par rapport à la longueur d'onde. Dans ce cas, des méthodes numériques rigoureuses (décrites plus loin) qui tenteraient de calculer le comportement du champ électromagnétique sur l'intégralité de la surface sont inaccessibles : pour des raisons de taille-mémoire, les ordinateurs en sont incapables. La théorie s'appuie donc sur le concept très intuitif de "rayon" : à partir de la notion de faisceau lumineux, il est en effet facile de concevoir un faisceau radar comme un ensemble de rayons. Un rayon se réfléchit sur une paroi lisse comme une balle rebondit sur un mur. Mais la diffraction des rayons autour d'une arête vive est une tout autre affaire : elle est analogue aux faisceaux lumineux divergents qui sortent d'une fente ou d'un trou percé dans une paroi. Dans la théorie géométrique de la diffraction électromagnétique, on utilise cette analogie. Le champ diffracté par un objet est ainsi "construit" en termes de rayons : réfléchis par les parties lisses, diffractés par ses arêtes vives ou ses coins, et pénétrant dans les parties non éclairées en "rampant" le long des parois. Dans son appareil mathématique, cette théorie en plein développement prolonge des travaux analytiques fort anciens et passablement complexes, faisant grand usage de "fonctions spéciales" : des travaux qui n'avaient, à l'époque, probablement pas d'autre objet que de prouver le talent mathématique de leurs auteurs et étaient totalement dépourvus d'applications pratiques.

Cette théorie est cependant loin d'être achevée. Sur le plan fondamental, certains problèmes clés n'ont toujours pas été résolus de manière satisfaisante, tandis que sur le plan pratique, la demande est forte pour mettre au point des outils performants... Il suffit d'ailleurs d'observer la deuxième génération des avions furtifs américains : les pans coupés et les arêtes vives, caractéristiques de l'étrange F-117 mis au point au début des années 1980, ne sont plus de mise aujourd'hui. Apparu au grand jour en 1988, le B-2 affiche désormais une silhouette aux formes arrondies, qui témoigne de la finesse accrue de la théorie... et de la puissance des moyens de calculs qui mettent en œuvre les résultats théoriques.

L'outil informatique a profondément transformé tous les domaines des sciences et techniques. Les électromagnéticiens, en délicatesse avec les redoutables équations de Maxwell, ont rapidement compris le parti à tirer du calcul numérique. La théorie des antennes, par exemple, avait depuis longtemps développé un ensemble de modèles mettant en jeu des équations intégrales, difficiles – sinon impossibles – à calculer avec un papier et un crayon. L'ordinateur, parfaitement adapté

3 – Il existe aussi des applications civiles : l'évaluation des réflexions parasites dans un système d'antennes porté par un satellite, par exemple...

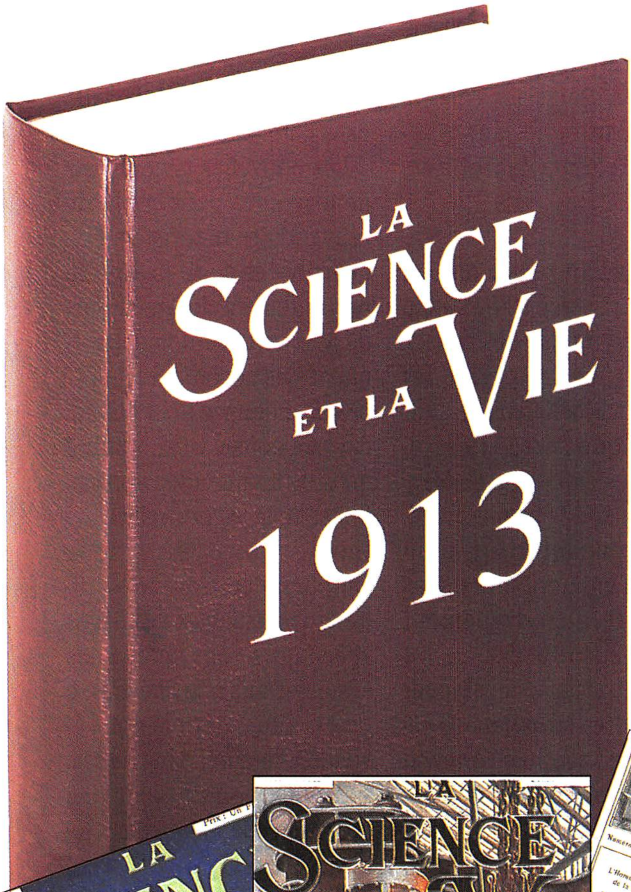
## L'OS DU "GIGO" ...

Pour l'électromagnéticien, la numérisation croissante de son métier – qui n'est aucunement l'apanage de cette profession – n'apporte pas que des bienfaits. Il est ainsi courant de déplorer la perte du sens physique des phénomènes, ici de la signification des équations de Maxwell. La fascination de l'outil, les nombreux logiciels de simulation disponibles, encouragent parfois une utilisation effrénée. Comme le résument les Anglo-Saxons : gigo (*garbage in – garbage out*). Entrez n'importe quoi dans la machine, il en sortira toujours quelque chose... en général n'importe quoi ! Mais qui sait si, lors de l'invention de l'écriture, certains ne se sont pas levés pour dénoncer l'abandon de la tradition orale : les hommes oublieront bientôt de se parler ! Tout outil novateur engendre ce genre de critique ; la véritable question réside dans l'apprentissage de son utilisation. A cet égard, les enseignants sont aujourd'hui confrontés à un réel problème. Comment le professeur d'électromagnétisme, qui a déjà bien du mal à faire passer le contenu physique de son cours, parviendra-t-il à intégrer l'emploi occasionnel de ces techniques numériques ? Sachant que, traditionnellement, le professeur ne fait usage que de calculs qu'il peut dérouler devant ses élèves... Faut-il former une nouvelle génération d'enseignants au croisement de la physique "pure et dure", des mathématiques et de "l'art" du calcul numérique ? L'inertie du système d'éducation est grande... Toutefois, si l'on n'y prend garde, le fossé entre l'enseignement de l'électromagnétisme et la vie professionnelle risque de se creuser davantage encore...

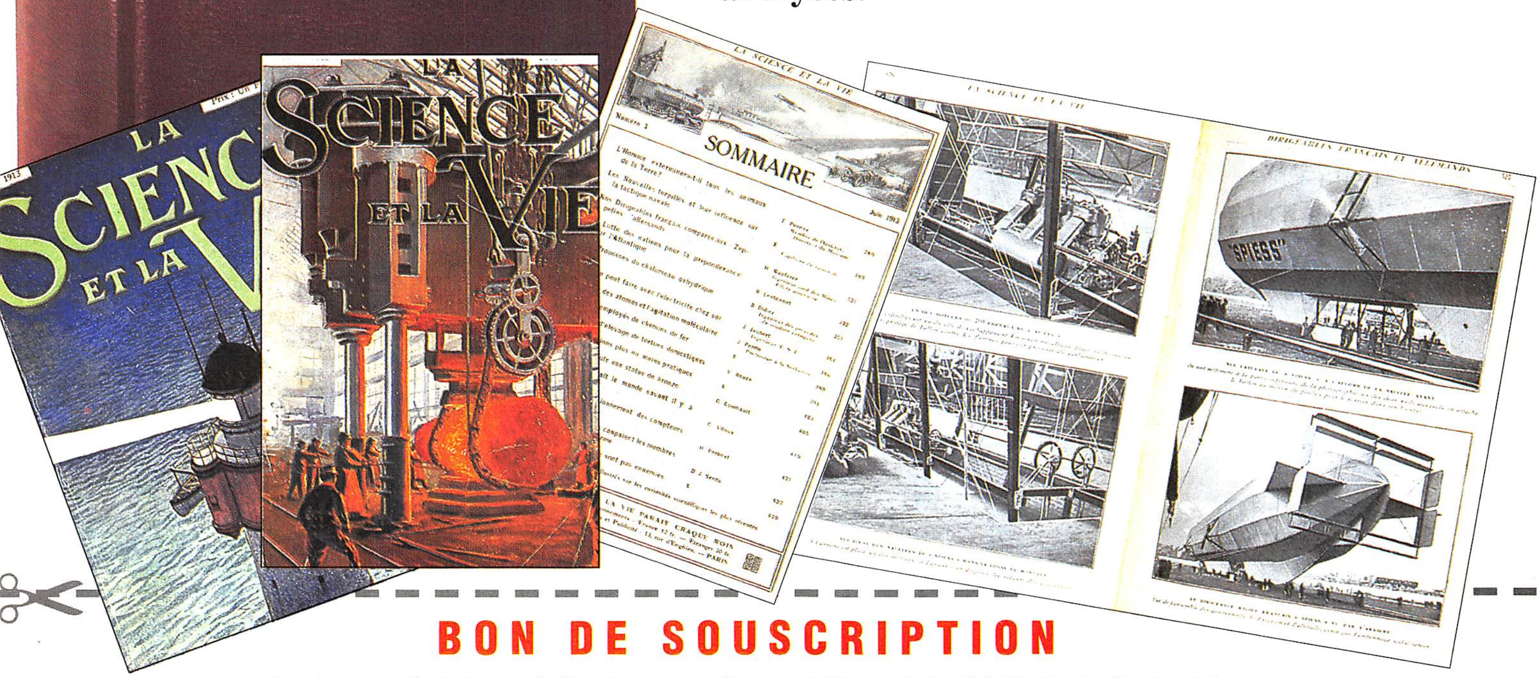
## 1913-1993 SPÉCIAL ANNIVERSAIRE : OFFREZ-VOUS LA COLLECTION DE TOUS LES NUMÉROS DE 1913 DE LA SCIENCE ET LA VIE ENFIN RÉÉDITÉE EN ÉDITION RELIÉE.

LES 9 PREMIERS NUMÉROS : 1300 PAGES

**370 F SEULEMENT !**




A l'occasion de son 80ème anniversaire, Science & Vie réédite en tirage limité les neuf premiers numéros de LA SCIENCE ET LA VIE parus en 1913. Cette réédition exceptionnelle réunira, en un superbe volume relié façon cuir, 9 couvertures couleurs et 1300 pages de l'actualité scientifique et technique d'une année charnière de notre histoire. Véritable témoin du temps passé cet ouvrage vous passionnera par sa richesse et vous étonnera par l'intérêt historique de ses analyses.




## BON DE SOUSCRIPTION

à retourner à Science & Vie 1, rue du Colonel Pierre Avia 75503 Paris Cedex 15

**OUI** je désire recevoir la réédition en un volume relié façon cuir des neuf premiers numéros de LA SCIENCE ET LA VIE (année 1913) au prix de 370 F (TVA à 5,5%)

+ 25 F de port pour la France métropolitaine, soit 395 F TTC au total. Etranger : 370 F (TVA 5,5%) + 95 F de port soit 465 F TTC.

● Ci-joint mon règlement total d'un montant

J'ai bien noté que la livraison interviendra dans un délai de six semaines.

Nom ______________________ Prénom ______________________

Adresse ______________________________________________

Code postal ______________ Ville ______________________

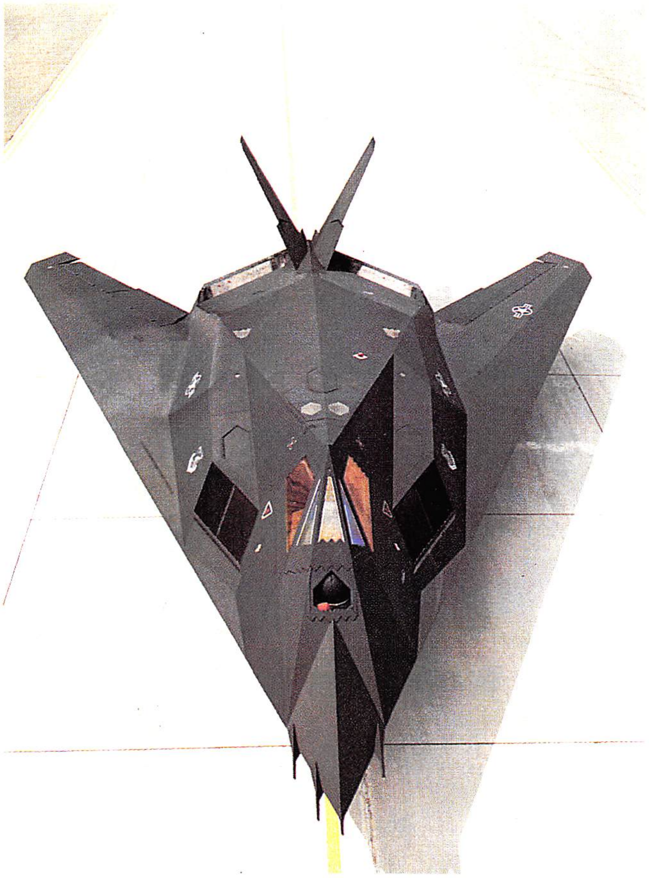
Si vous êtes abonné à SCIENCE & VIE , merci de nous indiquer votre numéro d'abonné : ______

Conformément à la législation en vigueur, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification pour toute information vous concernant sur tout fichier à usage commercial.

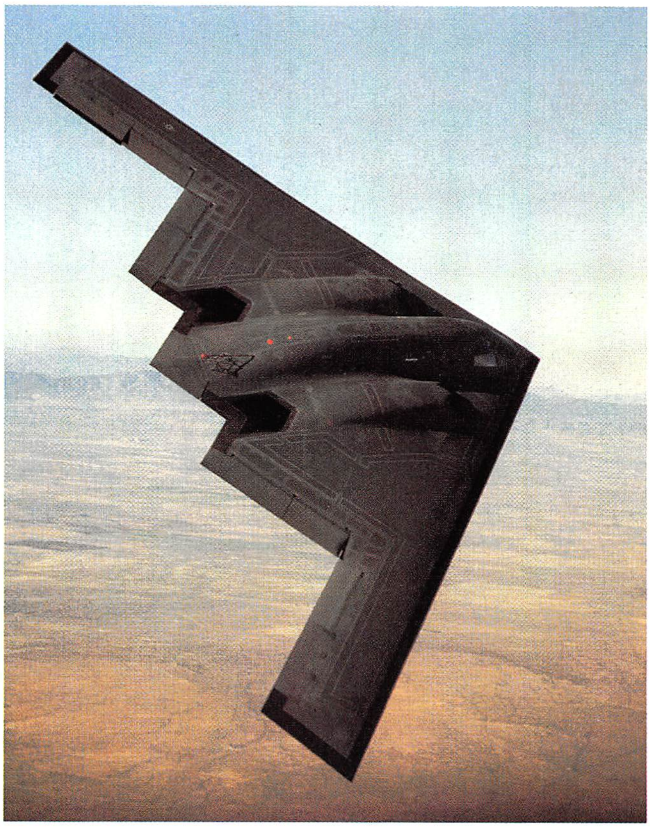
Etranger : nous consulter au 46 48 47 08

CSV 17

RC PARIS B 572 134 773



LOCKHEED



NORTHROP VIA B. THOUANEL

La conception d'avions furtifs exige une modélisation de la diffraction des ondes radar. Du F-117 (haut) au B2, les progrès dans la finesse des calculs ont permis de faire disparaître les pans coupés, si peu aérodynamiques.

pour dérouler ce type de calculs, a ainsi fait faire des bonds de géants aux concepteurs d'antennes sophistiquées (radars, satellites, etc.).

Fait remarquable, grâce à l'évolution rapide des capacités de calcul, les électromagnéticiens se sont en quelque sorte "rapprochés" des équations de Maxwell dans leur forme primitive. Pendant près d'un siècle, l'impossibilité de les résoudre analytiquement dans la majorité des cas les avait entraînés à développer de savantes formulations secondaires, adaptées à tel ou tel problème. Prenons l'exemple d'une diffraction sur une sphère métallique. Traiter le problème du champ dans le volume autour de la sphère était beaucoup trop gourmand en mémoire et en temps-calcul pour les premières générations d'ordinateurs. Dans ce cas précis, l'astuce courante consistait à tenter de réduire le problème à la surface de la sphère, passant d'un seul coup de trois à deux dimensions dans le calcul numérique. On considérait donc que le champ incident induisait des courants sur la surface de la sphère, et que ces courants engendraient le champ diffracté. Et une méthode analytique avait permis d'extraire des équations de Maxwell une équation dont l'inconnue était le courant sur la surface de la sphère. C'était cette équation secondaire qu'on "injectait" dans l'ordinateur.

Les nouvelles générations de machines permettent de réintroduire la troisième dimension, et de se passer du prétraitement des équations de Maxwell. L'étude des formulations secondaires n'est pas abandonnée pour autant, car elle conserve son utilité dans de nombreuses applications. Mais les nouvelles méthodes, outre leur grande simplicité conceptuelle, offrent d'indéniables avantages spécifiques dans l'étude des systèmes dits non linéaires, *a priori* plus délicats à résoudre. En effet, dans de tels systèmes, on ne peut pas considérer le milieu dans lequel le champ se propage comme une donnée fixe et indépendante. La présence du champ peut provoquer une modification locale du milieu, qu'il s'agit évidemment de prendre en compte : c'est le cas notamment pour les champs lasers intenses (les armes futuristes de la défunte guerre des étoiles, par exemple) ou des problèmes plus terre à terre (l'étude des circuits magnétiques de moteurs électriques à hautes performances).

A la lumière de ces quelques exemples, on aura perçu que les équations de Maxwell sont loin d'avoir fini leur carrière. Longtemps encore, des générations d'électromagnéticiens s'attacheront à les faire parler... ■

# Un savant exemplaire

# Archimède

Photo Roger-Viollet

Les prochains Cahiers de Science & Vie vous feront vivre un chapitre déterminant de l'histoire des sciences. Vous vous retrouverez trois siècles avant notre ère et vous rencontrerez la figure canonique du savant : Archimède. Tout à la fois philosophe, mathématicien, ingénieur, architecte, le génial savant grec transforma profondément le paysage scientifique de l'époque. Archimède, n'est pas seulement le père du fameux principe qui porte son nom, c'est un esprit exceptionnellement surdoué comme le monde en a peu connu. Au point que Pascal, dans sa célèbre pensée sur les trois ordres, ne met en scène que deux personnages : Archimède et Jésus-Christ. Le premier apparaissant dans l'ordre de l'esprit de la même manière que le second dans l'ordre de la charité. C'est donc avec ce personnage hors du commun que la collection 1993 des Cahiers de Science & Vie s'achèvera. Mais tout au long de l'année 1994, nous poursuivrons nos rencontres avec les pères fondateurs de la science.

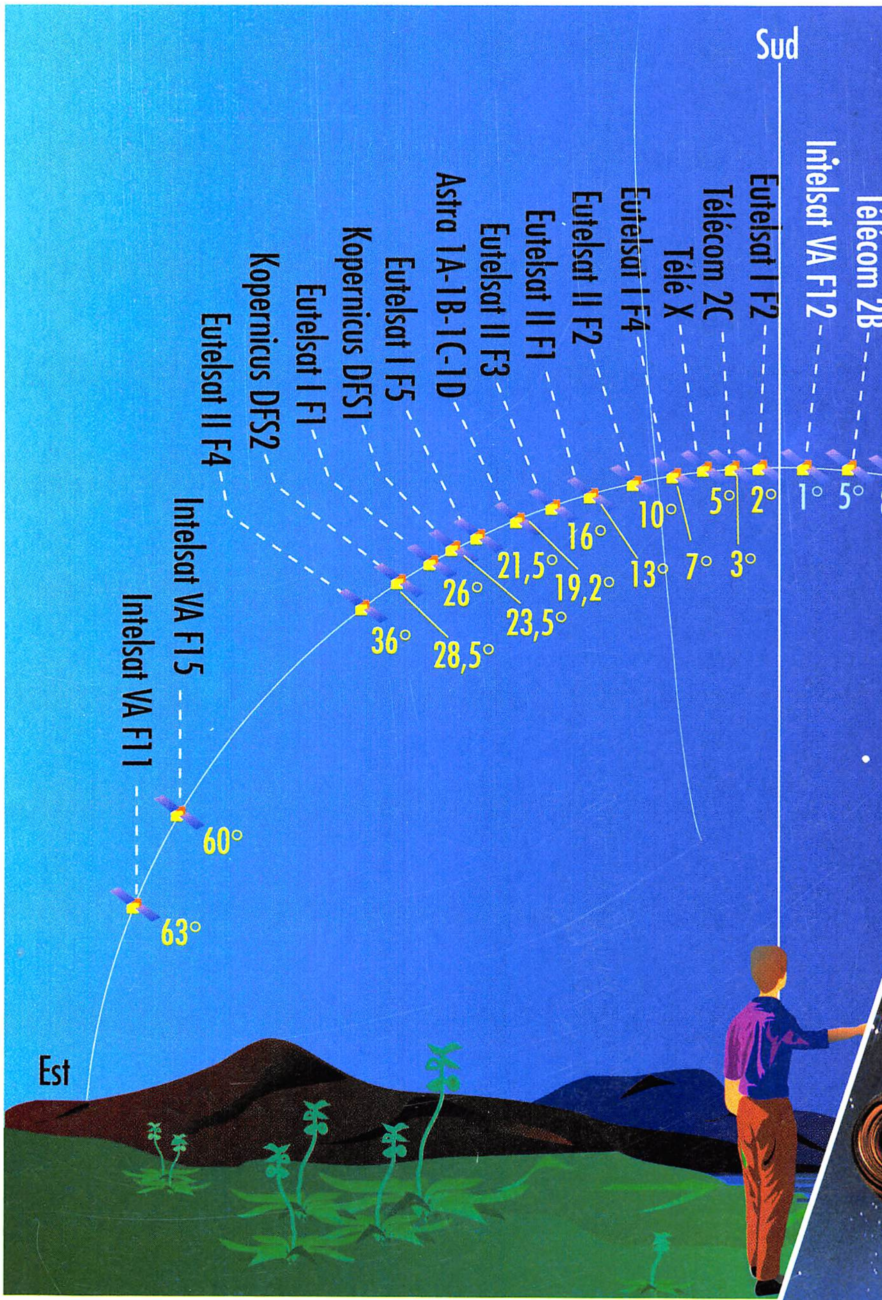
**LES CAHIERS DE SCIENCE & VIE**

**DES HISTOIRES RICHES EN DÉCOUVERTES**

**Parution le 16 décembre**

# TÉLÉVISION

# BRANCHEZ-VOUS SUR LE SATELLITE



Seuls, les satellites peuvent vous transmettre tous les programmes télé qui vous intéressent. SCIENCE & VIE HIGH TECH vous explique clairement comment réaliser votre installation de réception.

SCIENCE&VIE HIGH TECH
LE MAGAZINE DE L'IMAGE ET DU SON

**LE MAGAZINE DE L'IMAGE ET DU SON.**